

보안과제( ), 일반과제(○)      과제번호 20060377

최      중
연구보고서

게르마늄함유 친환경 농자재 및  
기능성농산물 생산기술 개발

Development of Production Techniques for  
Environment-friendly Agricultural Materials and  
Functional Agricultural Products with Germanium

연구기관  
경 상 대 학 교

농 립 수 산 식 품 부



# 제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “게르마늄함유 친환경 농자재 및 기능성농산물 생산기술 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2009년 4월 24일

주관연구기관명 : 경상대학교  
총괄연구책임자 : 허 종 수  
세부연구책임자 : 허 종 수  
연 구 원 : 서 동 철  
연 구 원 : 이 성 태  
연 구 원 : 조 인 재  
연 구 원 : 황 승 하  
연 구 원 : 김 형 준  
연 구 원 : 박 우 영  
연 구 원 : 임 종 서  
연 구 원 : 천 영 석  
연 구 원 : 박 성 규  
연 구 원 : 박 종 환  
연 구 원 : 김 봉 수  
연 구 원 : 천 상 옥

협동1연구기관명 : 순천대학교  
협동1연구책임자 : 조 주 식  
연 구 원 : 강 종 구  
연 구 원 : 김 홍 기  
연 구 원 : 김 성 은  
연 구 원 : 손 석 호  
연 구 원 : 박 양 주  
연 구 원 : 한 명 자  
연 구 원 : 성 선 진  
연 구 원 : 성 아 정

협동2연구기관명 : 순천대학교  
협동2연구책임자 : 이 성 태  
연 구 원 : 최 지 나  
연 구 원 : 신 성 해  
연 구 원 : 정 영 란  
연 구 원 : 박 정 은



# 요 약 문

## I. 제 목

게르마늄함유 친환경 농자재 및 기능성농산물 생산기술 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

게르마늄(Germanium)은 무기게르마늄과 유기게르마늄으로 분류할 수 있는데, 무기게르마늄( $\text{GeO}_2$ )은 인체내 유입시 빈혈, 신기능장애, 근육 장애를 유발하는 것으로 알려져 있으나(Obara et al., 1991), 유기게르마늄은 항종양 효과(Jang et al., 1991), 항돌연변이 효과(Mochizuki and Kada, 1982), natural killer 세포 및 macrophages의 활성화를 포함하는 면역강화 작용(Suzuki et al., 1986)과 virus 감염의 치료(Aso et al., 1985) 관절염 치료 효과와 같은 항염증 작용(Dimartino, 1986), 해열·진통 작용(Suzuki and Taguchi, 1983), 중금속 해독작용(Lee and Chung, 1991) 및 운동성 증가(Ho et al., 1990) 등의 다양한 약리작용을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 최근 게르마늄은 한방약재, 키토산, 인삼, 칼슘, 녹차, 목초액, 참숯, 맥반석 등의 농자재와 함께 유기게르마늄이 약리효과를 가진다는 보고로 기능성 농산물 생산을 위한 농자재에 사용되고 있는 실정이다.

특히, 게르마늄 농자재의 경우 토양 중 게르마늄 함량이 낮기 때문에 작물체중 게르마늄 함량이 낮아 무기게르마늄을 농자재로 사용하여 유기게르마늄화 하기위한 효과적인 농축의 수단으로 다양한 연구들이 그 동안 수행되었으며, 무기게르마늄을 유기게르마늄화하기 위한 수단으로는 미생물, 효모(Kehlbeck, 1983 ; Nobohiro et al., 1980 ; Wei, 1992)류 및 균조류를 이용하기도 하였으며, 몇몇 연구자는 유기게르마늄함유 식물체를 개발하기 위하여 일당귀와 인삼(Lee et al., 1994), 강활(Park et al., 1996)을 이용하기도 하였다.

게르마늄 농자재가 사용되어지고 있는 작물로는 벼, 참외, 단감, 고추, 딸기, 토마토, 부추 등 30여 개 품목에 재배면적도 667 ha에 이르며, 일반농산물 보다는 20-30% 높은 가격에 거래되고 있는 실정이다(농민신문, 2002). 하지만 현재 생산되고 있는 기능성농산물은 기능성 성분이 얼마나 함유되어 있는지 불확실하며, 또한 기능성이 과학적으로 검증되지 않은 상태에서 유통되고 있는 것이 대부분이고 단순히 한방영양제, 키토산, 게르마늄 등 특이한 농자재를 작물에 처리하여 생산한 농산물이면 기능성이 있는 것처럼 브랜드화하여 소비자들에게 많은 혼란을 야기시키고 있는 실정이다.

또한 다양한 종류의 게르마늄 관련 농자재가 농업에 사용되고 있으나 농자재와 게르마늄함유 농산물에 대한 게르마늄 함량이 얼마인지 불분명한 상태에서 농산물이 유통되고 있으며, 기능성을 목적으로 게르마늄을 사용하고 있지만 게르마늄함유 농산물의 기능성 검증에 대한 연구가 거의 없는 실정이다.

따라서 게르마늄함유 농자재와 농산물 중 게르마늄 함량을 분석하여 문제점을 파악하고 농작물의 게르마늄 흡수 효율을 높이기 위해 흡수 전이가 쉬운 게르마늄 농자재 개발이 필요하며, 작물에 있어 게르마늄 적정 처리농도 설정과 게르마늄 흡수특성 구명, 생산된 게르마늄함유 농산물이 유기게르마늄화 되었는지에 대한 증명, 기능성 검정에 의한 게르마늄 농산물의 안전성 연구를 통한 게르마늄함유 기능성 농산물 생산기술 개발이 절실히 필요할 것이다. 향후 이들 연구결과는 국내 농산물의 경쟁력 확보와 농산물의 브랜드화에 의한 농가소득 증대뿐만 아니라, 우리나라 기능성 농산물의 해외 수출이 가능할 것으로 판단된다.

이에 본 연구는 식물체내 흡수전이가 우수한 게르마늄함유 친환경 농자재를 개발하고, 이를 바탕으로 게르마늄함유 기능성 쌀 생산 기술을 개발하고, 게르마늄함유 기능성 채소 수경재배 기술을 개발하며, 게르마늄함유 기능성 채소의 안전성 및 약리효과를 검증하고자 하였다.

### Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

게르마늄함유 친환경 농자재 및 기능성 농산물 생산기술 개발을 위해 1차년도에는 시중에 유통되고 있는 게르마늄 농산물의 게르마늄 함량 조사와 게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술 개발 및 게르마늄함유 기능성 채소(상추) 수경재배 기술 개발을 위한 농산물의 생육특성, 게르마늄 독성범위 등 기초연구를 수행하였고, 게르마늄함유 기능성 농산물 재배에 필요한 농자재 확보를 위해 게르마늄함유 친환경 농자재 제조기술을 개발하였다. 또한 본 연구의 체계적인 기술 개발을 위해 식물체내 게르마늄 분석 및 시료전처리 최적화 방안을 검토하였다. 2차년도에는 게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술 개발의 기초연구를 토대로 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배법을 개발하였고, 게르마늄함유 기능성 채소(오이) 수경재배 기술 개발하였다. 또한 게르마늄함유 기능성 농산물의 동물실험을 통한 안전성 및 면역조절효과를 검토하였다. 3차년도에는 1-2차년도의 연구에서 개발한 친환경 농자재 및 기능성 농산물 생산기술을 실용화하기 위해 개발된 게르마늄 농자재 효과검정 및 기능성 쌀 및 채소 생산기술을 실용화하였고, 보다 안정적인 기능성농산물 생산을 위해 게르마늄 함유 기능성 농산물의 동물실험을 통한 항암효과를 검토하였다.

#### I. 농산물중 게르마늄 함량 분석을 위한 시료 전처리 최적화 방

- 분해액 종류별 게르마늄 회수율 검토
- 분해용액(HNO<sub>3</sub>) 농도별 게르마늄 회수율 검토
- 식물체내 게르마늄 최적 분석조건
- 연구결과 요약

#### II. 게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술 개발

##### 1. 게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술 개발

- 유통중인 게르마늄 함유 농산물중 게르마늄 함량조사
- 벼의 게르마늄 토양살포시 생육촉진 및 독성발생범위 구명
- 벼 생육시기별 게르마늄 엽면살포시 생육촉진 및 독성발생범위 구명

##### 2. 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배법 개발

- 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 구명
- 토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성 구명
- 게르마늄 처리방법별 벼의 게르마늄 흡수 특성 구명

##### 3. 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술 실용화

- 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육특성
- 게르마늄 종류에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성
- 게르마늄 종류에 따른 쌀 미질 특성

### Ⅲ. 게르마늄함유 기능성 채소 수경재배기술 개발

#### 1. 게르마늄과 셀레늄이 채소종자발아 및 유묘생장에 미치는 영향

- 게르마늄이 채소종자발아 및 유묘 생장에 미치는 영향
- 셀레늄이 채소종자발아 및 유묘 생장에 미치는 영향

#### 2. 게르마늄 함유 기능성 상추 수경재배 기술 개발

- 양액재배방식별 상추 생육특성 및 게르마늄 흡수특성 비교 검토
- 상추생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도범위 구명
- 상추 생육촉진 게르마늄 적정 처리농도 구명

#### 3. 게르마늄함유 기능성 오이 수경재배 기술 개발

- 오이 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위 구명
- 비고형배지경 (소형담액경)을 이용한 게르마늄 최적처리 방법 구명 및 식물체내 게르마늄 이동 특성 구명
- 고형배지경 (필라이트경)을 이용한 게르마늄 처리방법별 최적 게르마늄 처리횟수 구명

#### 4. 게르마늄함유 기능성 갓 수경재배 기술 개발

- 갓 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위 구명
- 비고형배지경 (소형 담액경)을 이용한 게르마늄 최적처리 방법 구명 및 식물체내 게르마늄 이동 특성 구명

### Ⅳ. 게르마늄함유 기능성 채소의 안전성 및 약리효과 검증

#### 1. 유기 게르마늄을 함유한 상추의 단일 경구투여 독성 시험

- 체중 변화
- 장기무게 측정
- 혈액학적 분석
- 혈액 생화학 분석
- 비장세포 증식반응 측정
- 세포 표면분자 분석

#### 2. 유기 게르마늄을 함유한 상추의 반복 경구투여 독성 시험

- 체중 변화
- 사료 및 물 섭취량
- 장기무게 측정
- 혈액학적 분석
- 혈액 생화학 분석
- 비장세포 증식반응 측정
- 세포 표면분자 분석
- 복수암에 대한 종양억제 효과측정



## V. 게르마늄함유 친환경 농자재 개발

1. 게르마늄관련 문헌 자료 정리 및 게르마늄 농자재 수집 분석
  - 게르마늄관련 자료 정리
  - 게르마늄관련 농자재의 문제점 분석
  - 시판 중인 게르마늄 함유 농자재의 수집, 분류 및 함량 분석
2. 용해교반기를 이용한 액상 게르마늄 시제품의 개발
  - 게르마늄( $\text{GeO}_2$ )의 용해 실험
  - 게르마늄 제제(액상)의 안정화 실험
  - 제형별 시제품 개발

## IV. 연구개발 결과

본 연구는 게르마늄함유 친환경 농자재 및 농작물 생산기술 개발을 위해 게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술 개발, 게르마늄 함유 기능성 채소 수경재배 기술 개발, 게르마늄함유 기능성 채소의 안전성 및 약리효과 검증 및 게르마늄함유 친환경 농자재 개발로 세분화하여 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

### 1. 농산물중 게르마늄 함량 분석을 위한 시료 전처리 최적화 방안

게르마늄은 전처리시 회화과정의 낮은 온도에서도 휘발성인 GeO나 GeS로 되어 손실을 일으키고 비등점 (84.0℃)이 낮아 높은 온도로 분해할 경우 휘발하기 쉬우므로 효율적이고 정확한 게르마늄 분석을 위해서는 첨단기기의 사용과 분석시료 특성에 가장 적합한 시료전처리 과정이 매우 중요하다. 본 연구에서도 시험연구의 목적에 맞는 가장 효율적인 시료전처리 과정을 찾기 위하여 정확한 온도조절이 가능하고 열전도효율이 정밀한 시료분해장치를 제작하여 최적의 분해용액, 분해용액농도, 분해시간 등을 검토하였고, 정확도와 정밀도를 고려한 분석결과의 타당성을 검토하기 위한 분석방법들을 비교 검토하였다.

분해액 종류별 게르마늄 회수율은 분해액으로 conc. HNO<sub>3</sub>용액을 사용하였을 때 높았으며 이때의 평균 회수율은 각각 약 94.3%이었다. 분해용액 농도별 게르마늄 회수율 (분해조건 : 분해용액 5 ml, 120℃, 4시간)은 분해액 (HNO<sub>3</sub>)과 H<sub>2</sub>O의 1:1 용액이 가장 적당하였다. 여러가지 분해 온도별 게르마늄회수율은 분해온도가 높아질수록 감소하는 경향이였으며 80-100℃ 범위의 온도에서는 큰 차이없이 약 95% 이상의 높은 회수율을 보였으나 120℃이상에서는 크게 감소하였다.

따라서 이러한 결과들을 토대로 식물체중 게르마늄 분석시험을 위한 최적의 시료 전처리과정을 정립하였으며, 그 과정은 건조시료 0.2 g에 분해용액으로 HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O = 1 : 1용액 3 mL을 첨가하여 제작한 분해장치를 이용하여 45℃에서 over night시킨 후 분해용액 2 mL을 첨가하여 80℃에서 4시간 분해시킨 다음, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 50 μL을 첨가하여 100℃에서 30분 더 분해시킨 후 3차 증류수로 10 mL로 정용하여 여과후 분석시료로 사용하였다.

### 2. 게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술 개발

#### 가. 게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술 개발

게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술을 개발하기 위해 현재 유통중인 게르마늄 함유 농산물중 게르마늄 함량을 조사하고, 이들 기초 결과들을 바탕으로 하여 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술을 개발하고자 하였다. 유통중인 게르마늄 함유 농산물의 게르마늄 함량은 곡류, 엽채류 및 과채류로 분류하여 각각 조사하였고, 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술 개발 연구는 벼의 게르마늄 토양처리시 생육촉진 및 독성 발생범위 구명과 벼의 게르마늄 엽면살포시 생육촉진

및 독성 발생범위 구멍으로 구분하여 각각 조사하였다. 벼의 게르마늄 토양처리시 생육촉진 및 독성 발생범위 구멍은 게르마늄의 토양처리 농도별 및 게르마늄 종류별로 나누어 조사하였고, 벼의 게르마늄 엽면살포시 생육촉진 및 독성발생범위 구멍은 게르마늄의 엽면처리 농도별, 게르마늄 엽면처리 횟수별 및 게르마늄 종류별로 나누어 조사하였다.

유통중인 게르마늄 함유 농산물중 게르마늄 함량을 조사한 결과 대부분의 게르마늄 함유 곡류, 엽채류 및 과채류의 게르마늄 함량이 일반 재배 농산물의 게르마늄 함량에 비해 약간 높거나 별 차이가 없었으며, 일부 품목의 경우 자연 함유량과 비슷한 수준을 보여 게르마늄 함유 농산물의 게르마늄 함량 검정과 게르마늄 함유 쌀 생산을 위한 체계적인 재배기술이 필요할 것으로 판단된다.

벼의 게르마늄 토양처리시 생육촉진 및 독성발생범위 구멍을 위한 게르마늄 토양처리 농도별 게르마늄 흡수 특성을 조사한 결과 게르마늄 처리농도가 증가할수록 게르마늄 독성 (phytotoxicity)이 증가 하였으며, 독성의 증가로 초장, 수장, 수수 및 천립중이 떨어져 수량이 감소되었다. 게르마늄  $8 \text{ mg kg}^{-1}$  이상에서 부터 게르마늄 독성이 나타났으며, 벼의 정상적인 생육을 위해서는 그 이하의 농도로 게르마늄을 처리하여야 할 것으로 판단된다. 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 잎 > 줄기 >> 뿌리 순이었으며, 특히  $\text{Ge } 12 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 처리한 pot에서 줄기 및 뿌리의 게르마늄 흡수량은 각각 254, 87.6 및  $0.2 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 가장 많은 흡수량을 보였다. 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 쌀겨 >> 현미 > 백미 순이었으며, 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 전반적으로 쌀겨에서 가장 높았고, 현미와 백미는 쌀겨에 비해 약간 낮았다.

게르마늄 종류별 토양처리시 게르마늄 흡수 특성은 전반적으로 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없었으며, 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 잎 > 줄기 >> 뿌리 순이었으며, Ge-132는 다른 게르마늄에 비해 흡수량이 약간 낮은 경향이였다. 쌀 부위별 게르마늄 함량은 쌀겨, 현미 및 백미 모두에서  $\text{GeO}_2$ 가 다른 게르마늄 처리에 비해 높은 함량을 보였다. 특히 게르마늄은 쌀의 껍질에 많이 분포되는 것으로 보이며, 쌀겨와 쌀눈 등이 포함된 현미의 게르마늄 함량이 백미에 비해 높았다. 따라서 쌀을 이용하여 게르마늄을 섭취하려면 되도록 도정공정을 줄인 현미가 좋을 것으로 판단된다.

벼의 게르마늄 엽면살포시 생육촉진 및 독성 발생범위 구멍을 위한 게르마늄 엽면처리 농도별 게르마늄 흡수 특성을 조사한 결과 게르마늄 엽면처리 농도가 증가 할수록 초장, 수장, 수수, 천립중 및 생산량이 점점 감소되는 경향이였다. 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 줄기와 잎은 비슷하였고, 상대적으로 뿌리는 매우 적은 흡수량을 보였다. 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 쌀겨 >> 현미 > 백미 순이었으며, 게르마늄 흡수율은 전반적으로 쌀겨에서 가장 높았고, 현미와 백미는 쌀겨에 비해 약간 낮았다.

게르마늄 엽면처리 횟수별 게르마늄 흡수특성은 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 잎 > 줄기 >> 뿌리 순으로 잎과 뿌리의 경우 처리횟수에 상관없이 비슷한 경향을 보인 반면 줄기의 경우 게르마늄 처리횟수가 증가함에 따라 게르마늄 흡수량도 증가하였다. 게르마늄 처

리횃수에 따른 게르마늄 흡수량은 3회 ≧ 2회 ≧ 1회이었고, 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 게르마늄 처리횃수 3회의 경우 쌀겨 ≧ 현미 > 백미로 쌀겨의 흡수율이 매우 높았다.

게르마늄 종류별 엽면처리시 게르마늄 흡수 특성을 조사한 결과 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 잎 ≧ 줄기 ≧ 뿌리 순이었으며, GeO<sub>2</sub>, Ge-132 및 Ge 표준용액은 비슷한 게르마늄 흡수량을 보인 반면 수도용 액상게르마늄은 다른 게르마늄에 비해 흡수량이 약간 낮은 경향이었다. 게르마늄 종류에 따른 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 쌀겨 ≧ 현미 > 백미 순이었으며, GeO<sub>2</sub> 처리는 다른 게르마늄 처리에 비해 흡수량이 약간 높은 경향이었다.

#### 나. 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배법

게르마늄함유 친환경농자재 및 기능성 농산물 생산기술 개발을 위한 기초연구결과를 바탕으로 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배법을 개발하고자 하였다. 우선 최적 품종을 선정하기 위해 호평, 주남, 일미 및 동진벼의 4품종에서 게르마늄 무처리, 토양처리 및 엽면처리로 구분하여 벼 품종별 벼의 생육특성, 벼 품종별 토양 중 무기성분 함량 변화, 벼 품종에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성 및 벼 품종에 따른 쌀 미질 특성을 각각 조사하였고 이들 결과를 이용하여 최적 품종을 선정하였다. 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배조건을 구명하기 위해 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 조사에서의 최적 품종 하에서 토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성, 게르마늄 처리방법별 벼의 게르마늄 흡수 특성 및 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횃수별 벼의 게르마늄 흡수 특성을 벼의 생육특성, 토양 중 무기성분 함량 변화, 게르마늄 흡수특성 및 쌀 미질 특성으로 나누어 각각 조사하였으며, 이들 결과를 이용하여 최적 토성, 게르마늄 처리방법, 게르마늄 종류 및 게르마늄 토양처리횃수를 선정하였다.

최적품종 선정을 위한 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성을 조사한 결과 벼의 생육은 호평벼가 타 품종에 비해 전반적으로 양호하였으며, 게르마늄 무처리와 토양처리시 벼의 생육은 엽면처리에 비해 양호하였다. 벼의 품종에 따른 쌀 생산량은 게르마늄 무처리구와 토양처리의 경우 호평 ≧ 주남 > 일미 ≧ 동진벼 순이었으며, 엽면처리의 경우 주남 > 일미 ≧ 호평 ≧ 동진벼 순이었다. 또한 쌀 생산량은 전반적으로 게르마늄 무처리 > 토양처리 > 엽면처리 순이었다. 벼 품종별 현미 중 게르마늄 함량은 게르마늄 무처리의 경우 품종에 따라 별 차이 없이 0.6~1.1 mg kg<sup>-1</sup> 정도로 거의 검출되지 않았고, 토양처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 14.5, 8.0, 11.6 및 10.4 mg kg<sup>-1</sup>로 호평 > 일미 > 동진 > 주남 순이었으며, 엽면처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 14.5, 11.8, 11.8 및 12.9 mg kg<sup>-1</sup>로 호평 > 동진 > 주남 ≧ 일미 순이었다. 벼 품종별 쌀겨 및 백미 중 게르마늄 함량도 현미와 유사한 경향이었다. 호평벼에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 토양처리의 경우 잎이 19.7%, 줄기가 3.1%, 뿌리가 0.006%, 쌀겨가 2.3% 및 현미가 0.43% (백미 0.25%)로서 전체 게르마늄의 총 25.5%가 흡수되고 토양내에 74.5%의 게르마늄이 잔류하였으며, 엽면처리의 경우 잎이 25.3%, 줄기가 1.2%, 뿌리가 0.006%, 쌀겨가 2.4% 현미가 0.29% (백미 0.23%)로서 전체 게르마늄의 총 29.2%가 흡수되고 토양내에 70.8%의 게르마늄이 잔류하였으며, 다른 품종에서도 비슷한 경향이었다. 게르마

늄의 흡수율은 전반적으로 엽면처리가 토양처리에 비해 높았으나 실제 주식으로 사용되는 현미나 백미 중의 게르마늄 흡수율은 토양처리가 엽면처리에 비해 거의 2배정도 높았다. 따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀을 생산하기 위해서는 현미나 백미 중 게르마늄 흡수량을 증대시켜야 하므로 게르마늄 토양처리가 엽면처리에 비해 적합할 것으로 판단된다. 벼 품종에 따른 쌀의 미질은 게르마늄 처리유무와 처리방법에 따라 별 차이 없었으며, 전반적으로 호평벼가 타 품종에 비해 가장 좋은 미질을 보였다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 품종은 호평벼이었다. 따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀을 효과적으로 생산하기 위해서는 호평벼를 재배하여야 할 것으로 판단된다.

최적 토성을 선정하기 위해 토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성을 조사한 결과 벼의 생육은 모든 토성에서 별 차이 없이 전반적으로 양호하였으며, 토성별 쌀 생산량은 전반적으로 미사질양토 > 식양토 > 양토 > 사양토 순이었다. 토성에 따른 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 쌀겨의 경우 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토가 각각 980, 868, 754 및 803  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 미사질양토가 다른 토성에 비해 가장 높았으며, 현미의 경우 전반적으로 미사질양토 > 사양토 > 식양토 > 양토 순으로 미사질양토가 140  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 백미의 경우도 현미와 비슷한 경향이였다. 미사질양토에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 잎이 19.7%, 줄기가 2.3%, 뿌리가 0.03%, 쌀겨가 3.1% 및 현미가 0.44% (백미 0.25%)로서 총 게르마늄의 25.8%가 흡수되고 토양내에 74.2%의 게르마늄이 잔류하였으며, 다른 토성도 비슷한 경향이였다. 토성에 따른 쌀의 미질은 토성에 따라 별 차이 없었으며, 전반적으로 미사질양토가 타 품종에 비해 가장 좋은 미질을 보였다. 따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 토성은 미사질양토이었다.

최적 게르마늄 처리방법을 선정하기 위해 게르마늄 처리방법별 벼의 게르마늄 흡수 특성을 조사한 결과 벼의 생육은 토양처리 및 토양·엽면 동시처리의 경우 양호한 성장을 보였으나, 엽면처리는 다른 조건에 비해 성장이 저조하였다. 게르마늄 처리방법별 쌀 생산량은 전반적으로 토양처리 > 토양·엽면 동시처리  $\approx$  엽면처리 순이었다. 게르마늄 처리방법에 따른 게르마늄 흡수량은 쌀겨의 경우 토양처리가 타 처리에 비해 가장 높은 결과를 보였으며, 현미의 경우 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리가 각각 140, 91 및 146  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 토양처리와 토양·엽면 동시처리가 엽면처리에 비해 높은 결과를 보였고, 백미의 경우 모든 처리에서 62~79  $\mu\text{g pot}^{-1}$  정도로 게르마늄 처리방법에 따라 별 차이 없었다. 토양처리에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 잎이 19.7%, 줄기가 2.3%, 뿌리가 0.003%, 쌀겨가 3.1% 현미가 0.44% (백미 0.25%)로서 총 게르마늄의 25.8%가 흡수되고 토양내에 74.2%의 게르마늄이 잔류하였다. 엽면처리와 토양·엽면 동시처리의 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 토양처리와 비슷한 경향이였으나, 현미나 백미 중 게르마늄 함량은 토양처리가 가장 높았다. 쌀의 미질은 게르마늄 처리방법에 따라 전반적으로 별 차이 없었으나, 토양처리가 다른 처리에 비해 미미하게 좋은 경향이였다. 따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 게르마늄 처리방법은 토양처리이었다.

최적 게르마늄과 토양처리 횟수를 선정하기 위해 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 게르마늄 흡수 특성을 조사한 결과  $\text{GeO}_2$  처리구가 Ge-132 처리구에 비해 생육이 저조하였

으며,  $\text{GeO}_2$  처리구 모두에서 게르마늄 독성으로 인해 잎 표면에 갈색 반점이 나타났다. 게르마늄 종류별 쌀 생산량은 Ge-132 처리구가  $\text{GeO}_2$  처리구에 비해 많았으며, 토양처리 횟수별 쌀 생산량은 전반적으로  $\text{GeO}_2$  처리구의 경우 3회 > 2회 > 1회 순이었으며, Ge-132 처리구의 경우 별 차이 없었다. 게르마늄 토양처리 횟수에 따른 현미의 게르마늄 흡수량은  $\text{GeO}_2$ 의 경우 1회, 2회 및 3회가 각각 151, 245 및 425  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 점점 증가하는 경향이었고, Ge-132 처리구의 경우  $\text{GeO}_2$  처리구에 비해 흡수량이 매우 적었으며, 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 미미하게 감소하는 경향이었다. 게르마늄 토양처리 횟수에 따른 백미와 쌀겨의 게르마늄 흡수량은 전반적으로 현미와 비슷한 경향이었으며, 백미의 게르마늄의 흡수량은 현미에 비해 적었다.  $\text{GeO}_2$  처리구에서 게르마늄 토양처리 횟수에 따른 게르마늄 흡수율은 1회 처리의 경우 잎이 18.8%, 줄기가 0.8%, 뿌리가 0.002%, 쌀겨가 1.6% 및 현미가 0.47% (백미 0.23%)로서 총 게르마늄의 21.7%가 흡수되고 토양내에 78.3%의 게르마늄이 잔류하였으며, 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 모든 부위에서 게르마늄 흡수율이 증가하였다. Ge-132 처리구에서 게르마늄의 흡수율은 게르마늄 토양처리 횟수에 따라 별 차이가 없었다. 쌀의 미질은 전반적으로  $\text{GeO}_2$  처리구가 Ge-132 처리구에 비해 약간 좋았다. 따라서 쌀에 게르마늄을 효과적으로 흡수시키기 위한 최적 게르마늄은  $\text{GeO}_2$ 이었고, 최적 게르마늄 토양처리 횟수는 3회이었다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 게르마늄 흡수량 증대를 위한 최적 품종은 호평벼이었고, 최적 토성은 미사질양토이었으며, 최적 처리방법은 게르마늄의 토양처리이었고, 최적 게르마늄은 무기게르마늄인  $\text{GeO}_2$ 이었으며, 최적 토양처리 횟수는 3회이었다. 하지만 게르마늄의 토양처리 횟수별 쌀의 게르마늄 함량은 벼 이식전 토양에 게르마늄 동량을 사전 처리한 결과와 비교해 볼 때 약간 높았으나, 쌀 생산량은 오히려 급격히 감소하였다. 그러므로 게르마늄의 토양처리 는 벼 이식전 토양에 게르마늄을 주입하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술 개발을 위한 최적 재배법은 미사질양토에 무기게르마늄 ( $\text{GeO}_2$ )을 8  $\text{mg kg}^{-1}$ 되게 주입한 후 최적 품종인 호평벼를 이식하여 재배하는 방법이 었다. 또한 게르마늄이 함유된 쌀을 효과적으로 섭취하기 위해서는 도정공정을 줄인 현미가 백미보다 좋을 것으로 판단되며, 효과적으로 벼에 흡수된 유기게르마늄을 섭취하기 위해서는 게르마늄이 많이 함유된 쌀겨를 가공식품 등에 활용할 수 있는 방안이 필요할 것으로 사료된다.

#### 다. 개발된 게르마늄 농자재 효과검정 및 기능성 쌀 생산기술 실용화

1-2차년도 의 pot시험에서 검증된 최적 품종, 최적 토성 및 최적 게르마늄 처리방법 등을 현장에 적용하여 적용성을 검증하고 개발된 기술을 실용화하기 위해 게르마늄 종류를 1차년도 연구에서 개발한 게르마늄 함유 농자재인 수도작용 액상 게르마늄과  $\text{GeO}_2$ 를 사용하여 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육특성, 게르마늄 종류에 따른 토양 중 무기성분 함량 변화, 게르마늄 종류에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성, 게르마늄 종류에 따른 쌀 미질 특성을 각각 조사하였다.

게르마늄 종류에 따른 벼의 생육특성을 조사한 결과 게르마늄 종류에 따른 벼의 초장은  $\text{GeO}_2$  처리구가 무처리구와 수도작용 액상게르마늄 처리구에 비해 초장이 약간 짧았다. 또한 모든 조건에서 벼의 초장은 전반적으로 생육시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향으로 특히 최대분얼기 이후에 급격히 증가하는 경향이였다. 게르마늄 종류별 벼의 초장, 잎수 및 분얼수는 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없었으며, 게르마늄을 처리한 두처리구 모두 무처리구에 비해 약간 적은 경향이였다. 수도작용 액상게르마늄 처리구의 경우 벼에 게르마늄에 의한 독성이 거의 나타나지 않은 반면에  $\text{GeO}_2$  처리구에서는 일부 벼에서 게르마늄의 독성이 나타났다. 수확 후 게르마늄 종류에 따른 간장, 수장, 수수 및 천립중 등의 생육특성은  $\text{GeO}_2$ 와 수도작용 액상게르마늄 처리구가 무처리구에 비해 약간 저조하였으나 게르마늄 처리구간에는 큰 차이 없이 비슷한 경향이였다. 게르마늄 종류별 쌀 생산량은 전반적으로 게르마늄을 처리하지 않은 무처리구가 게르마늄 처리구에 비해 약간 높은 결과를 보였다. 또한  $\text{GeO}_2$  처리구의 쌀 생산량은 수도작용 액상게르마늄 처리구에 비해 약간 저조하였다.

토양 중 무기성분 함량을 조사한 결과 게르마늄 처리구의 토양 중 T-N 함량은 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이  $391.6\text{--}392.6 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 무처리구의 평균  $385.8 \text{ mg kg}^{-1}$ 에 비해 유의성 있게 높았으나,  $\text{SiO}_2$ , K, Ca, Mg 및 Na 등의 함량은 모든 처리구에서 전반적으로 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이 유사한 경향이였다.

벼의 건물중량은 게르마늄 종류에 따라 다소 차이는 있으나 전반적으로 무처리구 >  $\text{GeO}_2$  처리구 > 수도작용 액상게르마늄 처리구 순이었다.

게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량을 조사한 결과 잎의 게르마늄 흡수량은  $\text{GeO}_2$  처리구에서 평균  $177.0 \mu\text{g m}^{-2}$ 로 수도작용 액상게르마늄 처리구보다 약 6배 높았다. 줄기의 게르마늄 흡수량은 잎과 비슷한 경향으로 전반적으로 큰 차이는 없었으나  $\text{GeO}_2$  처리구의 경우 평균  $24.8 \mu\text{g m}^{-2}$ 로 수도작용 액상게르마늄 처리구보다 약간 높았으나, 뿌리의 경우 게르마늄 처리구간에 큰 차이 없었다.

쌀 생산량은 게르마늄 종류에 따라 다소 차이는 있으나 전반적으로 현미 > 백미 > 쌀겨 순이었다. 게르마늄 종류에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량을 조사한 결과 쌀겨 중 게르마늄 함량은  $\text{GeO}_2$  처리구 및 수도작용 액상게르마늄 처리구 모두 별 차이 없이 비슷한 경향이였고, 현미 중 게르마늄 함량은  $\text{GeO}_2$  처리구에서 평균  $40.9 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 수도작용 액상게르마늄 처리구의 평균  $31.1 \text{ mg kg}^{-1}$ 보다 유의성 있게 높았다. 하지만 백미 중 게르마늄 함량은  $\text{GeO}_2$  처리구에서 평균  $7.9 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 수도작용 액상게르마늄 처리구의 평균  $14.3 \text{ mg kg}^{-1}$ 보다 유의성 있게 낮았다. 게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 전반적으로 잎 > 쌀겨 > 현미(백미) > 줄기 > 뿌리 순으로 잎에서 가장 높았다.

$\text{GeO}_2$  처리구의 게르마늄 흡수율은 잎이 11.1%, 줄기가 1.6%, 뿌리가 0.03%, 쌀겨가 2.2% 및 현미가 0.73% (백미 0.11%)로서 총 게르마늄의 15.56%가 흡수되고 84.4%의 게르마늄이 토양 내에 잔류하거나 유실되었다. 수도작용 액상게르마늄 처리구의 게르마늄 흡수율은 잎이 1.8%, 줄기가 0.46%, 뿌리가 0.01%, 쌀겨가 2.2% 및 현미가 0.71% (백미 0.22%)로서 총 게르마늄의

5.19%가 흡수되고 94.8%의 게르마늄이 토양 내에 잔류하거나 유실되는 경향으로 전반적으로 게르마늄 종류에 따른 게르마늄 흡수율은  $\text{GeO}_2$ 를 처리구가 수도작용 액상게르마늄 처리구에 비해 약간 높았다. 게르마늄 종류에 따른 쌀의 미질은 전반적으로 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이 모든 조건에서 좋은 미질을 보였다.

이상의 결과를 종합적으로 고려해 볼 때, 수도작용 액상게르마늄의 경우 식용으로 가장 많이 사용되는 백미 중 게르마늄 함량이  $\text{GeO}_2$ 에 비해 높았으나, 현미와 쌀겨를 포함한 쌀 전체의 게르마늄 흡수량은  $\text{GeO}_2$ 가 수도작용 액상게르마늄에 비해 높았다. 하지만  $\text{GeO}_2$ 의 경우 일부 벼에서 독성이 수도작용 액상게르마늄에 비해 심하였다. 따라서 벼의 생육과 게르마늄 흡수 모두를 안정적으로 만족시키기 위해서는 1차년도 연구에서 개발한 게르마늄 함유 친환경농자재인 수도작용 액상게르마늄이 효과적일 것으로 판단된다.

### 3. 게르마늄 함유 기능성 채소 수경재배 기술 개발

#### 가. 게르마늄과 셀레늄이 채소종자발아 및 유묘생장에 미치는 영향

식물의 종자발아와 유묘생장에 미치는 게르마늄과 셀레늄의 효과와 흡수특성을 조사하기 위하여, 대표적인 채소류인 상추, 갓, 배추 및 청경채를 이용하여 셀레늄과 게르마늄 농도에 따른 종자발아율, 유묘 성장특성 및 게르마늄 흡수 특성을 조사하였다.

게르마늄 처리에 의한 채소 종자발아는 모든 식물에서 무기게르마늄을  $100 \text{ mg L}^{-1}$  처리한 경우에만 약간의 저해를 받았고 나머지 조건에서는 거의 영향을 받지 않았다. 식물의 유묘생장에 미치는 게르마늄의 효과는 갓과 배추의 경우에는 모든 농도의 무기게르마늄( $10 \sim 100 \text{ mg L}^{-1}$ )에서 뿌리의 성장에 심각한 저해를 보였고 지상부 생장은 높은 농도 ( $50, 100 \text{ mg L}^{-1}$ )에서는 저해를 받지만 낮은 농도 ( $10, 25 \text{ mg L}^{-1}$ )에서는 오히려 약간의 성장 촉진효과를 보이거나 거의 차이가 없는 것으로 보였다.

유기게르마늄의 처리시에는 뿌리와 지상부의 생육이 낮은 농도 ( $10, 25, 50 \text{ mg L}^{-1}$ )의 대부분 조건에서 성장을 촉진하는 결과를 보였다. 식물체내의 게르마늄의 흡수 특성은 무기 및 유기게르마늄의 모든 조건에서 대조구에 비해 처리농도가 높아짐에 따라 점진적으로 뚜렷한 증가를 보였다. 특히 무기게르마늄을 처리한 경우보다 유기 게르마늄을 처리한 경우에 같은 농도에서 전반적으로 약 2-4.5배까지 많이 흡수되었다.  $25 \text{ mg L}^{-1}$  농도의 게르마늄을 처리한 경우를 보면, 유기게르마늄의 처리시 게르마늄의 흡수는 갓에서는 약 4배 (무기게르마늄:  $0.37 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$ , 유기게르마늄:  $1.47 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$ ), 배추에서는 약 2.2 배 (무기게르마늄:  $0.40 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$ , 유기게르마늄:  $0.86 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$ ) 그리고 청경채의 경우 약 2.1배 (무기게르마늄 :  $0.33 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$ , 유기게르마늄:  $0.70 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$ ) 정도로 무기게르마늄의 처리보다 높았다.

셀레늄 농도에 따른 채소종자별 발아특성은 전반적으로 상추와 배추는 발아율에 저해가 없었으나, 청경채와 갓은 농도가 높아짐에 따라 초기 발아율에 저해를 받았으며, 발아 1일째 청경채는  $50 \text{ mg L}^{-1}$ 에서 저해가 뚜렷하였다.

유묘생장에 미치는 셀레늄의 효과는 상추와 배추는 셀레늄 처리농도  $5 \text{ mg L}^{-1}$ 까지는 초기



식물생육 촉진형상을 보였으며 대조구의 길이와 비교하였을 때 1 mg L<sup>-1</sup> 농도에서 상추는 1.5 배 배추는 1.4배 증가하였다. 청경채와 갓은 셀레늄 처리농도 1 mg L<sup>-1</sup>에서는 대조구와 같거나 비슷하였으나, 5 mg L<sup>-1</sup> 이후부터는 농도가 높아짐에 따라 대조구에 비해 뿌리의 생육에 저해를 받았다.

유묘의 식물체내 셀레늄 흡수는 셀레늄 처리농도가 높을수록 흡수량이 비례적으로 증가하였다. 채소 종자식물별 셀레늄 흡수정도는 청경채 > 배추 > 갓 > 상추 순이었다. 채소종자별 발아 및 생장에 저해를 받지 않는 적정 셀레늄 처리 범위는 상추 및 배추는 1-5 mg L<sup>-1</sup> 범위, 청경채 및 갓은 1 mg L<sup>-1</sup>이내가 적당한 것으로 생각되었다.

#### 나. 게르마늄 함유 기능성 상추 수경재배 기술 개발

게르마늄이 함유된 기능성 상추 생산을 위한 표준화 수경재배기술을 확립하기 위하여 여러 가지 환경조건에 따른 양액 내 게르마늄의 안정화 정도를 검토하고, 양액재배방식별 상추 생육 특성 및 게르마늄 흡수특성 비교 검토하고 상추생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도범위를 구명하였다. 그리고 상추 생육촉진을 위한 게르마늄 적정 처리농도를 구명하고 상추 내 게르마늄 흡수특성과 이동특성을 구명하였다.

양액에 게르마늄 처리시 양액 중에 존재하는 다른 이온들과 침전형의 화합물형태로 전환됨으로서 식물 가용성 게르마늄 농도가 감소될 수 있으므로 게르마늄 농도를 10 ppm으로 고정하고 여러 가지 환경조건에 따른 양액 내 게르마늄의 안정화 정도를 검토하였다. 증류수와 양액 0.5배액 및 1.0배액 등 양액조성에 따른 게르마늄 용해도는 유기게르마늄과 무기게르마늄 모두 양액조성과 농도에 따른 가용성 게르마늄의 농도변화는 없었다. pH변화에 따른 게르마늄의 용해도는 pH 조정 중 pH 조정 시약과 양액내 성분과의 약간의 침전현상은 보였으나 게르마늄의 용해도는 모두 큰 차이가 없었다. pH 변화에 따른 게르마늄의 일반 식물영양원소 농도변화는 Ca과 P를 제외한 다른 원소들은 모든 pH 범위에서 변화가 없었으며, Ca과 P는 pH 8 이상에서 농도가 크게 감소되었다. 온도 수준별 용액내 게르마늄 농도는 보관 20일째부터 30°C에서는 게르마늄 용액내 약간의 침전현상을 보이긴 하였으나 모든 온도에서 게르마늄 함량 변화에 뚜렷한 큰 차이는 없었다.

상추 양액재배방법으로 고행배지경(펄라이트경)과 비고형배지경(소형담액경)을 이용하여 상추 육묘 정식 후 게르마늄 종류(유기, 무기)별, 농도별(0, 1, 3, 5 mg L<sup>-1</sup>)로 정식 2주 후의 생육특성과 게르마늄 흡수량을 비교 검토하였다. 재배방법에 따른 상추 생육은 고행배지경 및 비고형배지경 모두 큰 차이는 나타나지 않았다. 게르마늄 종류에 따른 생육은 유기게르마늄(G-132) 처리구에 비하여 무기게르마늄(GeO<sub>2</sub>) 처리구에서 생육이 전반적으로 약간 감소되는 경향이었으며, 유기게르마늄 처리구에서는 모든 농도 범위에서 대조구에 비하여 생육이 약간 촉진되는 경향이었고, 무기게르마늄 처리구에서는 생육 저해 현상이 뚜렷하게 나타났다. 재배방법별 상추 내 게르마늄 흡수량은 고행배지경에 비하여 비고형배지경에서 5배 이상 높은 것으로 나타났으며, 상추 내 흡수된 게르마늄 총량은 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마

높 처리구에서 매우 높았으며 처리농도가 높을수록 식물체내 게르마늄 흡수량도 증가되었다.

비고형배지경 (담액경) 수경재배방법을 이용하여 게르마늄 양액 내 처리와 엽면처리 방법의 상추생육에 대한 게르마늄 독성발생 범위를 검토하였다. 게르마늄 양액 내 처리시 게르마늄 농도에 따른 상추의 성장반응은 유기게르마늄 처리에 비하여 무기게르마늄 처리구에서 생육이 크게 저해되었으며 처리농도가 높아질수록 저해정도가 더 크게 나타났다. 유기게르마늄 처리구의 경우에 처리농도  $10 \text{ mg L}^{-1}$ 까지는 생육 촉진현상이 있었으며 무기게르마늄 처리구의 경우에는  $5 \text{ mg L}^{-1}$  처리농도 이상에서는 성장반응이 크게 저해되었다. 상추 내 게르마늄 흡수량은 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마늄 처리구에서 약간 높았다. 상추 내 흡수된 게르마늄은 유기게르마늄 처리구의 경우 대부분이 뿌리에 분포되어 있었으며, 무기게르마늄의 경우  $5$  및  $10 \text{ mg L}^{-1}$ 의 낮은 농도에서는 대부분이 뿌리에 분포되어 있었지만 처리농도  $30$  및  $50 \text{ mg L}^{-1}$ 에서는 잎에 더 많이 분포되어 있었다. 이상의 결과들로 볼 때 비고형배지경 (담액경)을 이용하여 게르마늄을 양액 내에 바로 처리하여 상추 재배시 생육적인 측면에서는 유기게르마늄의 경우  $10 \text{ mg L}^{-1}$  범위 이내, 무기게르마늄의 경우에는  $5 \text{ mg L}^{-1}$  이내가 적당할 것으로 판단되었다.

게르마늄 엽면처리시 상추 생육에 대한 게르마늄 독성발생 범위를 검토하였다. 게르마늄 엽면처리시 상추의 성장반응은 전체적으로 양액 내 처리에 비하여 저해를 적게 받았으며, 유기게르마늄 처리에서는 모든 처리농도에서 별 차이가 없었으나 무기게르마늄 처리구에서는  $30$  및  $50 \text{ mg L}^{-1}$  농도 처리구에서 약간의 성장반응 저해가 있었다. 상추 내 게르마늄 흡수량은 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마늄 처리구에서 거의 2배 이상 높았으며 게르마늄 처리농도가 높을수록 흡수량도 증가되었다. 상추 내 흡수된 게르마늄 분포는 무기게르마늄 처리구의 경우에는 거의 대부분이 지상부인 잎에 분포되어 있었으나 유기게르마늄의 경우에는 잎에 약 40%, 뿌리에 약 60%가 분포되어 있을 통해 흡수된 게르마늄의 상당량이 지하부인 뿌리로 이동된 것으로 나타났다.

pH는 식물의 무기원소 흡수에 영향을 많이 미치는 중요한 인자이므로 상추의 게르마늄 흡수 역시 pH에 따라 흡수특성이 달라질 수 있을 것으로 생각되어 pH에 따른 상추 내 게르마늄 흡수특성을 검토하였다. pH에 따른 전체적인 생육상황은 유기게르마늄 처리구 및 무기게르마늄 처리구 모두 pH에 따른 특별한 차이점이 없었다. 상추 내 게르마늄 흡수특성도 예상과는 달리 pH에 따라 게르마늄 종류별 흡수량, 상추 지상부와 지하부의 게르마늄 분포함량 등에서 특별한 차이점 없이 모든 시험 pH 범위에서 일정한 값을 보였다.

상추 내 게르마늄 흡수 특성과 이동특성을 구명하기 위하여 상추를 지상부인 Shoot와 지하부인 Root로 구분하고 지상부는 노화 잎 (old leaves), 어린 잎(young leaves)과 잎 중간의 주엽맥 (stem) 부분으로 구분하고, 뿌리부분은 주근(primary roots)과 측근(lateral roots)으로 세분화하여 각 부위별 게르마늄 분포특성을 비교 검토하였다. 상추 내 흡수된 전체 게르마늄 함량은 무기게르마늄 처리구에서는 약  $0.621 \text{ mg g}^{-1} \text{ DW}$ 였고, 유기게르마늄 처리구에서는 약  $1.1 \text{ mg g}^{-1} \text{ DW}$ 로서 무기게르마늄에 비하여 유기게르마늄의 흡수량이 약 1.8배 정도 높았다. 상추

지상부와 지하부의 분포정도는 무기게르마늄은 지상부에 약 23.7%, 지하부에 약 76.3%가 분포되어 있었고, 유기게르마늄의 경우에는 지상부에 약 11%, 지하부에 약 89%가 분포되어 있어 비하여 뿌리에 훨씬 많이 분포되어 있었다. 상추 부위별 게르마늄 분포정도는 무기게르마늄의 경우에는 전체적으로 lateral roots (61.4%) ≫ primary roots (14.9%) > old leaves (10.0%) > young leaves (7.2%) > stem (6.4%) 순으로 지하부인 측근에 가장 많이 분포되어 있었다. 유기게르마늄의 경우에도 전체적으로 lateral roots (65.9%) ≫ primary roots (23.1%) > stem (4.6%) > old leaves (3.4%) > young leaves (2.9%) 순으로 지하부인 주근과 측근에 많이 분포되어 있었다.

#### 다. 게르마늄함유 기능성 오이 수경재배 기술 개발

오이 종자 발아에 대한 게르마늄의 독성발생 농도범위를 구명하기 위하여 게르마늄 처리 농도별 발아율, 발아종자식물의 생육 특성 및 게르마늄 흡수 정도를 조사하였다. 게르마늄처리에 따른 오이 종자의 발아특성은 전반적으로 유기게르마늄에 비하여 무기게르마늄 처리에서 약간의 초기발아 저해현상이 보였으나 전체적으로는 종자발아에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 발아된 오이 유묘의 성장반응은 유기게르마늄에 비해 무기게르마늄에서 생육저해를 크게 받는 것으로 나타났다. 게르마늄 처리 농도별 성장반응은 전체적으로 무기게르마늄의 경우 처리농도 5 mg L<sup>-1</sup> 까지 유기게르마늄의 경우에는 처리농도 10 mg L<sup>-1</sup>까지는 성장반응에 대한 저해 현상이 나타나지 않았다. 따라서 게르마늄이 오이종자 발아 자체에 미치는 영향은 거의 없었지만 발아 후 종자 생육에는 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 오이 종자발아 단계에서의 게르마늄 적정 처리농도는 무기게르마늄의 경우는 5 mg L<sup>-1</sup>이내, 유기게르마늄의 경우에는 10 mg L<sup>-1</sup> 이내가 적당할 것으로 판단되었다.

오이 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위 및 최적 게르마늄 처리 농도를 구명하기 위하여 게르마늄 처리 농도별 생육특성, 식물체 내 게르마늄 흡수특성, 양액 내 게르마늄 및 일 반성분 함량 변화 등을 조사하였다. 무기게르마늄과 유기게르마늄 처리농도별 생육은 무기게르마늄의 경우 대조구에 비하여 전체적으로 생체중은 약 23%, 길이는 약 31% 감소되었으며, 유기게르마늄 처리구에서는 생체중은 약 7% 정도 감소되어 대조구와 별 차이가 없었으며 길이는 약 20% 정도 감소되었다. 게르마늄 농도에 따른 오이의 생육특성은 전체적으로 유기게르마늄 처리에 비하여 무기게르마늄 처리구에서는 매우 큰 생육저해 현상을 보였으며, 생체중의 경우 무기게르마늄 처리에서는 대조구에 비하여 지상부는 약 40%, 지하부는 약 42%가 감소되었으며, 유기게르마늄 처리에서는 각각 약 4% 및 25%가 감소되었고, 전체 길이는 무기게르마늄 처리에서는 지상부가 약 21%, 지하부가 약 11% 감소되었으며, 유기게르마늄 처리구에서는 오히려 대조구에 비하여 지상부, 지하부 모두 식물체 길이가 약간 증가되었다. 게르마늄 처리 유무에 따른 식물체내 chlorophyll -a 및 b 함량은 유기게르마늄의 경우에는 특별한 경향 없이 대조구와 유사하였지만 무기게르마늄 처리에서는 chlorophyll -b 함량은 별 차이가 없었으나 chlorophyll -a 함량은 농도가 높을수록 무처리에 비하여 크게 감소되었다.

식물체 부위별 게르마늄 분포 정도는 무기게르마늄의 경우에는 전체적으로 Stem (43.3%) > Leaf (34.2%) > Root (22.5%) 순으로 뿌리에 비하여 줄기와 잎에 매우 높게 분포되어 있었으며, 유기게르마늄은 Root (89.6%) ≫ Stem (7.7%) > Leaf (2.7%) 순으로 거의 대부분이 뿌리에 분포되어 있었다. 식물체내 전체 게르마늄 함량은 무기게르마늄 처리구에서 유기게르마늄 처리구에 비하여 약 2.2배 정도 높았으며, 식물체 부위별 흡수함량은 잎과 줄기에서는 무기게르마늄이 유기게르마늄에 비하여 각각 약 27.0배 및 12.2배 높았고 뿌리에서는 유기게르마늄 처리구에서 무기게르마늄 처리구에 비하여 약 1.9배 높은 것으로 나타났다. 초기 용액 내 투입된 게르마늄 중 식물체내로 흡수된량은 무기게르마늄 처리구의 경우 처리농도  $1 \text{ mg L}^{-1}$  (투입 게르마늄 함량  $398 \text{ } \mu\text{g}$ )에서는 약 14.4%에 해당하는 약  $57.6 \text{ } \mu\text{g}$  이 식물체내로 흡수되었으며 식물체 부위별 흡수율 분포는 잎 (65.6%) ≫ 줄기 (21.9%) > 뿌리 (12.5%) 순으로 거의 대부분이 잎과 줄기에 분포되어 있었고, 유기게르마늄 처리구의 경우에는 처리농도  $1 \text{ mg L}^{-1}$  (투입 게르마늄 함량  $389 \text{ } \mu\text{g}$ )에서는 약 2.8%에 해당하는 약  $10.8 \text{ } \mu\text{g}$  이 식물체내로 흡수되어 무기게르마늄에 비하여 식물체 흡수효율이 매우 낮았으며 식물체 부위별 흡수율 분포는 뿌리 (79.3%) ≫ 잎 (12.4%) > 뿌리 (8.3%)로 무기게르마늄과는 달리 뿌리에 대부분이 흡수되어 있었다.

초기 용액 내 투입된 전체 게르마늄 (무기게르마늄 약  $24,214 \text{ } \mu\text{g}$ , 유기게르마늄 약  $24,343 \text{ } \mu\text{g}$ ) 중 식물체내로 흡수된 게르마늄 총량은 무기게르마늄 처리구가 약 11.4%에 해당하는 약  $2,754.8 \text{ } \mu\text{g}$ 이 흡수되었고 유기게르마늄 처리구에서 약 1.8%에 해당하는 약  $430.5 \text{ } \mu\text{g}$ 이 흡수되어 유기게르마늄에 비하여 무기게르마늄의 흡수량이 약 6.4배 정도 높았다. 전체 흡수된 게르마늄의 식물체 부위별 게르마늄 총 흡수량은 무기게르마늄 처리에서는 잎에 약  $1,937 \text{ } \mu\text{g}$ , 줄기에 약  $658 \text{ } \mu\text{g}$ , 뿌리에 약  $160 \text{ } \mu\text{g}$ 으로서 잎에 가장 많이 흡수되어 있었으며, 유기게르마늄 처리구에서는 잎에 약  $119 \text{ } \mu\text{g}$ , 줄기에 약  $253 \text{ } \mu\text{g}$ , 뿌리에 약  $431 \text{ } \mu\text{g}$ 으로 무기게르마늄과는 달리 뿌리에 가장 많은 양이 흡수되어 있었다. 무기게르마늄 처리에서는 초기 게르마늄 투입량의 약 88.6%가 용액 중에 잔류되어 있었고 약 11.4%가 식물체내로 흡수되었고, 유기게르마늄 처리에서는 초기 게르마늄 투입량의 약 98.2%가 용액 중에 잔류되어 있었고 약 1.8%만이 식물체내로 흡수되어 무기게르마늄에 비하여 식물체내 흡수효율이 매우 낮았다.

비고형배지경을 이용한 게르마늄 최적처리방법을 구명하기 위하여 게르마늄을 양액 내 관주처리, 엽면처리 및 양액 내 관주처리+엽면처리의 3가지 방법에 따른 식물체 성장반응특성과 게르마늄 흡수특성을 비교 검토하였다. 무기게르마늄 처리구에서는 엽면처리의 경우에는 전체적으로 생육저해현상이 크게 나타나지 않았으나 양액 내 관주처리와 양액 내 관주처리+엽면처리에서는 지상부 및 지하부의 생육이 크게 저해되었으며 지상부 및 지하부의 생체중이 양액 내 관주처리에서 각각 약 83% 및 81%, 관주처리+엽면처리에서는 각각 약 71% 및 76% 감소되었다. 유기게르마늄 처리구의 경우에는 전체적으로 처리방법에 따른 생육 저해현상이 거의 나타나지 않았다. 게르마늄 처리방법에 따른 과실의 특성은 전체적으로 무기게르마늄 처리구의 경우 엽면처리에서는 큰 차이 없이 대조구와 유사한 생육 특성을 보였으나 관주처리와 관주+엽

면처리에서는 과실의 길이, 중량, 둘레가 크게 감소되었으며 과실생장 감소정도는 관주처리 > 관주+엽면처리 ≧ 엽면처리 순이었다. 그리고 유기게르마늄 처리구의 경우에는 3가지 처리방법 모두에서 과실의 길이, 중량, 둘레 등이 대조구와 비슷하거나 약간 증가되는 경향이였다.

식물체내 게르마늄 분포 및 이동특성을 구명하기 위하여 게르마늄 처리방법에 따른 오이 식물체와 과실을 부위별로 세분화하여 부위별 게르마늄 분포와 이동특성을 비교 검토하였다. 게르마늄 처리방법에 따른 식물체 부위별 게르마늄 함량은 게르마늄 처리방법에 따라 큰 차이가 났으며, 게르마늄 종류에 따라서도 차이가 있었다. 처리방법별 게르마늄 흡수 농도 분포는 전체적으로 식물체 부위별로도 큰 차이가 있었으며 흡수농도 분포정도는 유기게르마늄 처리구에 비하여 무기게르마늄 처리구에서 훨씬 높았다. 양액 내 관주처리의 경우 무기게르마늄의 경우에는 흡수된 게르마늄의 약 94%가 지상부인 과실, 줄기 잎 등에 분포되어 있었고 지하부인 뿌리에는 약 5.9%만이 존재하였다. 유기게르마늄의 경우에는 무기게르마늄과는 반대로 97%가 지하부인 뿌리에 존재하였고 2.7%만이 지상부인 과실, 줄기, 잎 등에 분포하였다. 엽면처리에서는 무기게르마늄의 경우 지상부에 약 61%, 지하부인 뿌리에 약 39%로서 지상부인 잎, 줄기 등에 존재하는 비율이 낮아지고 지하부인 뿌리에 존재하는 비율이 높아졌다. 유기게르마늄의 경우에는 지상부에 약 62%, 지하부에 약 38%로서 양액 내 처리에 비하여 지상부에 존재하는 비율이 훨씬 높았다. 그리고 관주처리와 엽면처리를 동시에 하였을 경우에는 양액 내 관주처리에서와 거의 유사한 경향을 나타내었으며, 무기게르마늄처리의 경우 지하부인 뿌리에 존재하는 비율이 약간 높아졌으나 유기게르마늄 처리구에서는 별 차이가 없었다.

식물체 지상부 stage별 게르마늄 함량은 무기게르마늄과 유기게르마늄 모두 top stage > middle stage > bottom stage 순으로 분포되어 있었으며, 엽면처리의 경우에는 무기 및 유기 게르마늄 모두 middle stage > bottom stage > top stage 순으로서 양액 내 관주처리와는 다른 분포양상을 보였다. 지상부 각 stage를 과실 (fruit), 잎 (leaf), 잎줄기 (petiole) 및 줄기 (stem)로 구분한 부위별 게르마늄 흡수 분포농도는 양액 내 관주처리의 경우 무기게르마늄처리에서는 잎줄기 (36.4%) > 잎 (33.1%) > 줄기 (28.5%) ≧ 과실 (2.1%) 순으로서 과실인 오이에는 분포함량이 매우 낮았으며, 유기게르마늄 처리에서는 잎줄기 (37.1%) > 잎 (27.7%) > 잎 (18.0%) ≧ 과실 (17.2%)로 무기게르마늄에 비해 유기게르마늄 처리에서 과실 내 분포함량이 높았다. 엽면처리에서는 관주처리와 관주+엽면처리에 비하여 무기 및 유기게르마늄 처리구 모두 잎에 분포되어 있는 함량이 월등히 높았다. 관주+엽면처리에서는 무기게르마늄의 경우 관주 처리에 비하여 과실 내 게르마늄 분포함량이 증가되었으며, 무기 및 유기게르마늄 처리구 모두 잎의 게르마늄 분포함량이 크게 감소하고 엽면처리에 비하여 줄기 내 게르마늄 함량분포가 크게 증가되었다.

식물체내에 흡수된 전체 게르마늄의 지하부인 뿌리와 지상부에 흡수된 량은 처리방법과 게르마늄 종류에 따라서 매우 다른 양상을 나타냈었으며 관주처리의 경우 식물체내 흡수된 게르마늄 54.5 mg중 지상부에 약 53.9 mg, 지하부인 뿌리에 약 0.27 mg이 분포되어 거의 대부분이 지상부로 이동하였으며, 유기게르마늄의 경우에는 전체 흡수된 게르마늄 약 27 mg중 지상부에

약 9.2 mg, 지하부에 약 17.8 mg이 흡수되어 무기게르마늄과는 다른 흡수양상을 보였다. 엽면 처리에서는 무기게르마늄의 경우에는 식물체내 흡수된 게르마늄 약 3.6 mg중 지상부에 약 3.5 mg, 지하부에 약 0.1 mg이 흡수되어 관주처리와 유사한 양상을 보였지만, 유기게르마늄의 경우에는 관주처리에서와는 달리 식물체내 흡수된 전체 게르마늄 약 3.13 mg중 지상부에 약 3.05 mg, 지하부에 약 0.08 mg이 흡수되어 거의 대부분이 지상부에 흡수되어 있는 것으로 나타나 유기게르마늄은 식물체내에서 이동이 잘 안 되는 것으로 생각되었다. 그리고 엽면+관주처리에서는 무기게르마늄 및 유기게르마늄 처리 모두에서 관주처리와 유사한 경향을 보였다.

오이의 식용 부위인 과실의 부위별 게르마늄 분포함량은

전체적으로 모든 처리구에서 꼭지에 가장 높은 농도로 분포되어 있었으며, 과실인 오이 길이에 따라서는 무기게르마늄의 경우에는 모든 처리방법에서 전반적으로 꼭지와 가까운 part I에 가장 높은 농도로 분포되어 있었고, 유기게르마늄의 경우에는 전체적으로 과실 길이별로 뚜렷한 경향 없이 비교적 일정한 농도로 고르게 분포되어 있었다. 그리고 과실의 식용 부위인 오이 껍질 (rind), 과육 (pulp), 오이 속 (seeds)의 게르마늄 분포함량은 게르마늄 처리방법에 따른 차이는 없었으며, 각 부위별 게르마늄 분포함량은 전체적으로 모든 처리구에서 껍질 (52.7-37.1%) > 과육 (36.6-31.5%) > 오이 속 (26.7-15.7%) 순으로 과실의 부위에 따라서도 분포 정도에 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

용액 내 투입된 전체 게르마늄 중 식물체내로 흡수된 게르마늄 흡수율은 무기게르마늄의 경우 관주처리에서 약 27.3%, 엽면처리에서는 약 17.9%, 관주+엽면처리에서 약 37.2%로서 전체 이용효율은 관주처리와 엽면처리를 병행하였을 경우에 더 높았으며, 유기게르마늄 처리구의 경우에는 관주처리에서 약 13.6%, 엽면처리에서 약 15.8%, 엽면+관주처리에서 약 14.7%로서 엽면처리에 의해 약간 흡수효율이 증가되는 경향이 보였으나 큰 차이는 없었다.

따라서 게르마늄 처리방법에 따른 식물체 성장반응과 식물체내 게르마늄 분포농도, 흡수량 및 흡수율 등의 결과들을 종합적으로 비교 검토해 볼 때 무기게르마늄의 경우에는 관주처리와 엽면처리를 동시에 하는 방법이 더 효과적이었으며, 유기게르마늄의 경우에는 처리방법에 따른 식물체 전체 이용효율에는 큰 차이가 없었으나 엽면처리에서 흡수된 게르마늄의 지상부로의 이동효율이 높았고 또한 과실인 오이 내 흡수효율이 관주처리와 관주+엽면처리에 비하여 매우 높았으므로 엽면처리가 더 효과적일 것으로 판단되었다.

고형배지경 (필라이트경)을 이용한 오이재배시 게르마늄 최적처리방법과 최적 처리농도를 구명하기 위하여 고형배지경 재배방법중의 하나인 필라이트경을 사용하여 오이 생육특성 및 오이 내 게르마늄 흡수특성을 비교 검토하였다. 게르마늄 처리방법 및 처리농도에 따른 전반적인 성장반응은 무기 및 유기게르마늄 처리구 모두 게르마늄 처리방법과 처리농도에 따른 뚜렷한 차이가 나타나지 않았으나 생체중은 처리방법과 처리농도에 따라 약간의 차이가 있었다. 전체적으로 관주처리에 비하여 엽면처리에서 생육감소가 높아 소액 담액경을 이용한 연구결과와는 약간 다른 경향을 보였으며, 게르마늄 처리방법에 따른 생육 감소 정도는 엽면처리 > 관주+엽면처리 > 관주처리 순으로서 생육적인 측면만을 고려할 때 게르마늄 최적처리방법은 유기게르

마늄의 경우에는 세 가지 처리방법 모두 별 차이가 없었으나 무기게르마늄의 경우에는 관주처리가 가장 양호한 것으로 나타났다. 펄라이트를 이용한 고품배지경의 오이재배에서는 오이 내 게르마늄 흡수효율은 동일농도에서 무기게르마늄에 비하여 유기게르마늄의 흡수효율이 높았다. 그리고 무기 및 유기게르마늄 모두 관주처리에 비하여 엽면처리를 할 경우 과실 내 게르마늄 흡수량이 증대되었고, 특히 유기게르마늄의 경우에는 관주처리에 비하여 과실 내 게르마늄 함량이 엽면처리에서는 약 28배, 관주+엽면처리에서는 약 10배 증가되었다. 게르마늄 처리방법에 따른 지상부 및 지하부의 게르마늄 처리횟수별 생육 특성은 관주처리와 엽면처리 의 경우 무기게르마늄 처리에서는 전반적으로 3-4회 처리에서 약간 더 양호한 것으로 보이지만 뚜렷한 차이는 없었고, 유기게르마늄의 경우에는 처리횟수에 따른 생육 차이는 없었다. 그리고 관주분할 처리의 경우 에도 처리횟수에 따른 차이는 보이지 않았다. 게르마늄 처리방법에 따른 처리횟수별 과실 (오이) 형성 특성은 게르마늄 처리방법별 처리횟수에 따른 뚜렷한 차이는 보이지 않았으며, 전반적으로 무기게르마늄 처리구에서는 3-4회 처리에서 과실 중량과 길이, 둘레 등이 약간 더 증가된 것으로 보였지만 그 차이는 미미하였다.

#### 라. 게르마늄함유 기능성 잣 수경재배 기술 개발

잣 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위 및 최적 게르마늄 처리 농도를 구명하기 위하여 게르마늄 처리 농도별 생육특성, 식물체 내 게르마늄 흡수특성, 양액 내 게르마늄 및 일반 성분 함량 변화 등을 조사하였다. 잣에 대한 게르마늄의 생육저해 정도는 유기 및 무기게르마늄 모두  $10 \text{ mg L}^{-1}$ 처리 까지는 나타나지 않았고 전체적으로 무기게르마늄은  $5 \text{ mg L}^{-1}$ 처리까지, 유기게르마늄은  $10 \text{ mg L}^{-1}$ 처리까지 지상부 및 지하부 생장반응이 대조구에 비하여 약간 증가되는 경향이였다. 게르마늄 처리농도별 식물체 건조중량은 무기게르마늄은  $10 \text{ mg L}^{-1}$ 처리 농도 까지, 유기게르마늄은  $25 \text{ mg L}^{-1}$ 처리농도 까지는 지상부 및 지하부 건조중량 모두 대조구에 비하여 약간 증가되었다. 게르마늄 종류별 식물체내 전체 게르마늄 흡수량은 유기게르마늄 처리구에 비하여 무기게르마늄 처리구에서 약간 높았으나 큰 차이는 없었으며, 게르마늄 처리 농도별 흡수패턴은 전반적으로 무기 및 유기게르마늄 모두 처리농도가 높을수록 식물체내 흡수량이 증가되었다. 식물체 부위별 게르마늄 흡수 분포 농도는 게르마늄 종류에 따라 다르게 나타났는데 전반적으로 무기게르마늄 처리에서는 지상부인 잎에 주로 많이 분포되어 있었고 유기게르마늄의 경우에는 지하부인 뿌리에 주로 분포되어 있었다. 유기 및 무기게르마늄  $50 \text{ mg L}^{-1}$ 까지의 전체 처리구에서의 지상부 및 지하부 게르마늄 평균함량분포는 무기게르마늄의 경우 총 흡수된 게르마늄 중 지상부인 잎에 약 70%, 지하부인 뿌리에 약 30%가 분포되어 있었다. 유기게르마늄의 경우에는 무기게르마늄과는 반대로 잎에 약 23%, 뿌리에 약 77%로 뿌리에 훨씬 많이 분포되어 있었다.

초기 용액 내 투입된 게르마늄의 식물체 개체 당 흡수 이용효율은 유기게르마늄에 비하여 무기게르마늄이 약간 높았다. 식물체내 흡수된 게르마늄 함량은 무기게르마늄 처리구의 경우 처리농도  $2.5 \text{ mg L}^{-1}$  (투입 게르마늄 함량  $254 \text{ } \mu\text{g}$ )에서는 전체 투입 게르마늄중 약 3%에 해

당하는 약 7.49  $\mu\text{g}$  (지상부 6.34  $\mu\text{g}$ , 지하부 1.14  $\mu\text{g}$ )이 식물체내로 흡수되었고 흡수된 게르마늄 중 지상부인 잎에 약 84.8%, 지하부인 뿌리에 약 15.2%가 분포되어 있었다. 유기게르마늄 처리구의 경우에는 처리농도 2.5  $\text{mg L}^{-1}$  (투입 게르마늄 함량 249  $\mu\text{g}$ )에서는 전체 투입 게르마늄 249  $\mu\text{g}$ 중 약 2.6%에 해당하는 약 6.36  $\mu\text{g}$  (지상부 4.22  $\mu\text{g}$ , 지하부 2.14  $\mu\text{g}$ )이 식물체내로 흡수되어 무기게르마늄에 비하여 식물체 흡수율이 약간 낮았다. 전체 흡수된 게르마늄 중 잎에 약 66.3%, 뿌리에 약 33.4%로 무기게르마늄과 같이 지상부에 게르마늄 흡수율이 높았지만 무기게르마늄에 비해 지상부로 이동되는 양이 적은 것으로 보였다.

식물체내 주요 양이온 함량은 무기 및 유기게르마늄 처리에서 다르게 나타났으며 전체적으로 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마늄 처리구에서 높았다. 생장저해를 비교적 받지 않는 정상적인 생육 처리농도인 10  $\text{mg L}^{-1}$  처리농도까지의 각 양이온의 함량은 무기게르마늄 처리구에서는 지상부인 잎에서는 K와 Na함량은 대조구에 비하여 감소되었고 Ca 및 Mg 함량은 차이가 없었다. 지하부인 뿌리의 경우에는 Ca 함량은 대조구와 대조구와 차이가 없었으나 K, MG 및 Na 이온은 증가되었다. 유기게르마늄 처리구에서는 지상부인 잎에서는 K 및 Na 함량은 차이가 없었으나 Ca 및 Mg 함량이 증가되었고 뿌리에서는 K, Ca, Mg 및 Na 함량 모두 증가되었다.

식물체내 게르마늄 최적처리 방법 및 흡수특성 구명을 위하여 담액수경 방식으로 정식 후 1회 양액 내 처리, 양액 내 분할처리 및 양액 내 수확 전 처리하여 처리방법별 생장반응특성과 게르마늄 흡수특성을 비교 검토하였다. 게르마늄 처리방법에 따른 게르마늄 종류 및 농도별 생육특성은 유기 게르마늄의 전체적으로 생장반응 차이가 없었으나 무기게르마늄의 경우에는 12  $\text{mg L}^{-1}$ 에서는 지상부와 지하부 모두 생육저해가 없었으나 24  $\text{mg L}^{-1}$ 에서는 생육저해가 나타났으며, 정식 후 1회 처리에서 생장반응 저해현상이 두드러지게 나타났다. 게르마늄 처리에 따른 뿌리 세포형태 변화를 관찰한 결과 무기 게르마늄처리구의 경우 세포의 크기가 매우 작고 세포수가 증가하여 매우 조밀한 형태를 보이고 있으며 유기게르마늄의 경우에는 세포의 크기가 매우 크고 세포 수는 감소하였다.

게르마늄 처리방법에 따른 지상부의 게르마늄 함량은 무기 및 유기 게르마늄 모두 정식 후 1회 처리 > 분할 처리 > 수확 전 처리 순이었고 지하부의 경우에는 정식 직후 처리의 함량이 가장 높았으며 무기 게르마늄의 경우 분할처리 및 수확 전 처리는 비슷한 함량을 보였으나 유기 게르마늄의 경우 분할 처리보다 오히려 수확 전 처리의 게르마늄 함량이 더 높았다. 게르마늄 처리 방법에 따른 전체 식물체내 게르마늄 흡수량은 무기 게르마늄의 경우에는 정식 후 1회 처리 및 분할처리가 비슷한 흡수량을 보였으며 수확전 처리에서는 매우 낮았으며, 유기 게르마늄의 경우에는 처리방법에 따른 큰 차이는 없었다.

따라서 게르마늄 처리방법에 따른 식물체 생장반응과 식물체내 게르마늄 분포농도, 흡수량 및 흡수율 등의 결과들을 종합적으로 비교 검토해 볼 때 무기게르마늄 및 유기게르마늄 모두 정식 후 1회 처리 및 분할 처리가 가장 효과적이었고 유기 게르마늄에 비해 무기 게르마늄이 더 효과적이었다. 게르마늄 농도에 따른 게르마늄 함량은 24  $\text{mg L}^{-1}$ 에서 높지만 건물중량을



고려한 게르마늄의 흡수량은 농도에 따른 차이가 거의 없어  $12 \text{ mg L}^{-1}$ 을 처리하는 것이 더 효과적인 것으로 생각되었다.

#### 4. 게르마늄함유 기능성 채소의 안전성 및 약리효과 검증

##### 가. 유기 게르마늄을 함유한 상추의 단일 경구투여 독성 시험

유기게르마늄과 무기게르마늄을 첨가하여 양액 재배한 상추의 안전성을 평가하기 위하여 게르마늄 함유 상추의 생쥐(C57BL/6)에 대한 단회 경구 독성시험을 수행하였다. 실험 전 기간 동안 사망한 실험동물은 없었으며, 일반증상과 임상증상도 관찰되지 않았고, 부검 결과 어떠한 육안적 병변도 관찰되지 않았다. 그리고 대조군과 시료 투여군 간의 체중 차이도 관찰되지 않았다. 암컷의 사료 소비량과 물 섭취량은 수컷에 비해 약간 적은 것으로 나타났다. 암컷의 경우에 대조군에 비해 각 실험군의 장기 무게가 모두 약간 감소하는 경우(흉선, 오른쪽 난소)와 약간 증가하는 경우(왼쪽 난소)가 있었고, 수컷의 경우에도 흉선, 심장, 오른쪽 신장, 왼쪽 부고환의 무게가 대조군에 비해 모든 실험군에서 약간 감소하였지만 유의한 차이는 아니었고, 왼쪽 신장과 좌우 고환의 무게가 약간 증가하였지만 역시 유의한 차이는 아니었다. 암수 간의 몸무게에 대한 상대적인 장기 무게의 차이는 모두 정상적인 범위 내에 속하였다. 혈액 생화학적 검사 결과, 수컷의 경우에는 GPT와 GOT 측정값이 대조군에 비해 Ge-132를 함유한 상추를 먹인 실험군에서 유의적으로 감소하였고, LDH 측정값이 대조군에 비해 실험군에서 각각 유의적으로 감소하였다. 혈액학적 검사에서는 수컷의 혈소판(PLT) 수치가 대조군에 비해 각 실험군이 증가한 것으로 나타났지만 유의적인 변화는 아니었다. LPS와 Con A 자극에 대해 비장세포의 증식반응과, 비장세포 내 B세포, 보조 T세포, 세포독성 T세포의 비율은 유의한 차이가 없었다. 이상의 실험 결과로  $\text{GeO}_2$ 와 Ge-132 ( $60 \text{ mg kg}^{-1}$ )를 함유한 상추 분말을 식약청 고시에 명시된 최고농도인  $2,000 \text{ mg kg}^{-1}$ 을 단회 경구 투여하였을 때, 시료와 관련된 특기할만한 독성증상이 관찰되지 않았다.

##### 나. 유기 게르마늄을 함유한 상추의 반복 경구투여 독성 시험

유기게르마늄과 무기게르마늄을 첨가하여 양액 재배한 상추의 장기적 투여에 대한 안전성을 평가하기 위하여 게르마늄 함유 상추의 생쥐(C57BL/6)에 대한 반복 경구투여 독성시험을 수행하였다. 실험 전 기간인 13주 동안 사망한 실험동물은 없었으며, 일반증상과 임상증상도 관찰되지 않았고, 부검 결과 어떠한 육안적 병변도 관찰되지 않았다. 그리고 대조군과 시료 투여군 간의 체중 차이도 관찰되지 않았다. 암컷의 사료 소비량과 물 섭취량은 수컷에 비해 약간 적은 것으로 나타났다. 장기무게의 경우에도 절대적인 무게와 상대적인 무게를 비교한 결과, 암수 각 실험군에서 대조군에 비해 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 흉선의 경우에 암컷의 평균적인 무게가 수컷에 비해 약간 무거운 것으로 나타났고, 심장과 좌우 신장의 무게는 암컷에 비해 수컷의 경우에 약간 무거운 것으로 나타났다. 그리고 뇌와 흉선의 상대적 무게가 수컷에 비해 암컷이 무거운 것으로 나타났다. 혈액 생화학적 검사 및 혈액학적 결과에서 암수 모두 대조군에 비해

각 실험군의 측정값에 유의한 변화는 없는 것으로 나타났다. LPS와 Con A 자극에 대해 비장 세포의 증식반응과, 비장세포 내 B세포, 보조 T세포, 세포독성 T세포의 비율은 유의한 차이가 없었다. 각 시료를 4주간 매일 투여하고 복수암세포를 생쥐 복강에 투여하여 항종양효과를 관찰한 결과  $\text{GeO}_2$ 를 함유한 상추 분말을 투여한 실험군에서 생존일수증양치 (MST)와 연명율 (ILS)이 증가하는 것을 확인하였다. 이상의 실험 결과로  $\text{GeO}_2$ 와  $\text{Ge-132}$  ( $500 \text{ mg kg}^{-1}$ )를 함유한 상추 분말을 13주간 매일 경구 투여하였을 때, 시료와 관련된 특기할만한 독성증상이 관찰되지 않았다.

## 5. 게르마늄함유 친환경 농자재 개발

경제적이고 식물체 흡수이용효율이 높은 게르마늄 함유 친환경 농자재를 개발하기 위하여 고효율의 게르마늄 용해방법을 정립하고 용액 내 게르마늄의 안정화 방안 검토하여 게르마늄 농자재 제형별 시제품을 제조하였다.

일반적으로 게르마늄 농자재의 원료로 사용하고 있는  $\text{GeO}_2$ 는 물에 대한 용해도가 매우 낮으므로 이를 효율적이고 경제적인 용해기술 확보가 매우 중요하다. 본 실험에서는 최적의 용매를 선별하기 위하여 여러 종류의 산과 알칼리 종류, 물 등을 용매로 하여  $\text{GeO}_2$  용해도를 검토하였으며 알칼리액을 혼합하여 사용하는 경우에는 각각의 알칼리수 원액을 2:1의 비율로 사용하는 것이 효과적이었다. 게르마늄과 용매의 혼합비는 중량을 기준으로 용매와 순수게르마늄 ( $\text{GeO}_2$ )의 비율에서 게르마늄의 함량이 낮을수록 바람직하였으며, 일반적으로 100 : 0.1-10의 비율로 혼합하였을 때 용해도가 높았으며, 100:1의 비율에서 가장 경제적이었다. 게르마늄 용해에 있어서 온도 조건은 매우 민감하였으며 용해과정은 35-120°C 중에서도 90-98°C의 온도에서 수행하는 것이 효과적이었으며, 특히 95°C의 온도에서 최적의 결과를 나타냈다. 적절히 배합된 혼합액은 용해시간 30분-24시간 중에서 3시간 교반 하에 숙성시킴으로써 게르마늄 용해액을 충분히 얻을 수 있었다.

무기 게르마늄은 용해가 되었다 하더라도 주변의 조건에 따라서 결정화가 일어날 가능성이 있기 때문에 이를 안정화시킬 수 있는 방안을 검토하였다. 무기 게르마늄을 온도나 수분에 대해 안정화시키기 위해서는 게르마늄 용해액의 pH를 7.0-7.5 범위로 조정해주는 것이 효과가 우수하였으며, 안정화제제로는 차아인산나트륨 또는 수산화나트륨을 게르마늄의 양을 기준으로 약 1:0.5~2의 비율로 첨가할 수 있었으며, 게르마늄의 양과 비슷하게 맞춰 첨가하는 것이 최적의 안정화 효과를 얻을 수 있었다.

상기의 연구결과들을 토대로 온도를 비롯한 제반 환경의 변화에도 결정화되지 않는 안정된 상태를 지속적으로 유지하는 액상형태의 게르마늄 비료의 시제품을 제조하였으며, 소성 패화석과 분말상태의 광물질에 액상화한 게르마늄 비료를 첨가하여 고형의 입제 형태로 제조한 시제품을 제조하였다.

현재 식물체의 게르마늄 흡수이용효율을 높이기 위한 여러 가지 방안을 검토 중에 있으며 그 한 가지 방안으로 게르마늄을 나노화 시키는 방법을 찾았으며 몇 가지 기초 실험에서 기존

의 단순한 용해방법에 비하여 식물체 흡수효율이 매우 높아지는 것을 확인하였다. 현재 이 기술은 (주)NANO PLEX와 공동 연구중에 있다.

## V. 연구성과 및 성과활용 계획

### 1. 연구성과

#### 가. 논문게재

게재연도	논문명	교신저자	학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분	SCI 구분
2007	채소종자 발아와 육묘생장에 미치는 유기 또는 무기게르마늄의 효과 및 흡수특성	조주식	한국환경농학회지	26 (3)	국내	
2008	게르마늄 토양처리시 토성이 벼의 생육 및 게르마늄 흡수에 미치는 영향	허중수	한국환경농학회지	27 (3)	국내	
2008	게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 품종 및 게르마늄 시비 방법 선정	허중수	한국환경농학회지	27 (4)	국내	
2009	게르마늄을 함유한 상추의 단일 경구투여 독성 검사	이성태	한국환경농학회지	28 (1)	국내	
	Differential Effect of GeO <sub>2</sub> and Ge-132 on Lettuce Plant Growth and Its Uptake Properties	조주식	JKSABC	심사중		SCIE
	Differential regulation of GeO <sub>2</sub> and Ge-132 on cucumber growth and its accumulation properties	조주식	Journal of Plant Nutrition and Soil Science	심사중		SCI

#### 나. 학술회의 논문발표

발표연도	논문명	교신저자	학술회의명	발표일	장소
2007	Rice Cultivation Technology for Production of Functional Rice with Germanium in Soil	허중수	동남아시아토양학회	2007. 10	일본
2007	Development of Rice Cultivation Technology Using Foliar Sprays of Germanium Solution for Production of Functional Rice with Germanium	조주식	동남아시아토양학회	2007. 10	일본
2007	Effect of germanium (Ge) on plant growth and characteristics of Ge accumulation from lettuce	조주식	동남아시아토양학회	2007. 10	일본
2008	Plant growth, germanium accumulation and distribution pattern under various Ge-132 and GeO <sub>2</sub> treatment from cucumber	조주식	미국토양화학회	2008. 10	미국
2008	Characterization of lettuce plant growth and germanium accumulation under various Ge-132 and GeO <sub>2</sub> treatment	조주식	미국토양화학회	2008. 10	미국

발표 연도	논문명	교신저자	학술회의명	발표일	장소
2008	Effect of rice cultivation on rice cultivars for production of functional rice with germanium in Korea	허종수	미국토양화학회	2008. 10	미국
2008	Production of functional rice with germanium under different soil texture in soil application	허종수	미국토양화학회	2008. 10	미국
2006	상추와 청경채 생육에 대한 게르마늄의 영향 및 흡수특성	조주식	한국토양비료학회	2006. 10	한국
2006	수경재배 상추에 대한 게르마늄(Ge)의 영향 및 흡수특성	조주식	한국토양비료학회	2006. 10	한국
2007	Uptake and effect of Germanium(Ge) on seed germination and plant growth in Chinese Cabbage and in Leaf Mustard	조주식	한국응용생명화학회 국제심포지움	2006. 10	한국
2007	Effect of various pH with germanium solution on seed germination and growth of Lettuce	조주식	한국응용생명화학회	2007. 4	한국
2007	Effect of various GeO <sub>2</sub> and Ge-132 concentrations on seed germination and growth of Lettuce	조주식	한국응용생명화학회	2007. 4	한국
2007	Effect of germanium(Ge) Early growth and uptake from Lettuce seedling	조주식	한국토양비료학회	2007. 5	한국
2007	Development of rice cultivation technology in soil for production of functional rice with germanium	허종수	한국토양비료학회	2007. 5	한국
2007	Investigation of germanium absorption under different foliar sprays of germanium solution for production of functional rice with germanium	허종수	한국토양비료학회	2007. 5	한국
2007	Effect of germanium(Ge) on growth and uptake from hydroponically-grown	조주식	한국토양비료학회	2007. 5	한국
2007	Growth characteristics and Ge uptake with germanium treatments on hydroponically-grown Lettuce	조주식	한국환경농학회	2007. 7	한국
2007	Characteristics of Ge accumulation and lettuce growth with treatment of organic or inorganic germanium	조주식	한국응용생명화학회	2007. 10	한국

발표연도	논문명	교신저자	학술회의명	발표일	장소
2008	유기 또는 무기 게르마늄 처리가 상추생육에 미치는 영향과 Ge 흡수 특성 분석	조주식	한국토양비료학회	2008. 5	한국
2008	유기 또는 무기 게르마늄 처리가 오이생육에 미치는 영향과 Ge 축적 및 분포 특성 조사	조주식	한국토양비료학회	2008. 5	한국
2008	게르마늄 함유 기능성 농산물 생산기술 개발	허종수	한국환경농학회	2008. 7	한국
2008	Characterization of Ge uptake and lettuce growth with inorganic or organic germanium treatments	조주식	한국환경농학회	2008. 7	한국
2008	Characterization of cucumber growth with Ge-132 and GeO2 treatment and its accumulation and distribution in plants	조주식	한국환경농학회	2008. 7	한국
2008	게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 품종 선정	허종수	한국환경농학회	2008. 7	한국
2008	게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 토성 선정	허종수	한국환경농학회	2008. 7	한국

다. 특허 성과

- 게르마늄 액상 비료 제조기술은 현재 특허 출원 준비 중에 있으며 나노화된 게르마늄 액상 비료 제조기술은 작물시험 후 특허 출원 예정임.

라. 기술료 징수 현황

- 본 연구과제의 연구성과물은 게르마늄 함유 기능성 농산물을 생산하기 위한 재배기술과 관련된 것이므로 기업체를 통한 사업화 보다는 영농법인이나 농민단체에 무상기술이전을 하였음.
- 현재 5개의 영농법인에 무상기술이전을 하고 기술지도 중에 있음
  - 기술이전 영농법인 : 5개소 (광양가남매실농원영농조합법인, 새싹유기영농조합법인, 생기들녘영농조합법인, 신금친환경쌀영농조합법인, 영농회사법인 농자천(유))

마. 사업화 현황

해당사항 없음.

바. 인력활용/양성 성과

- (1) 인력지원 성과

지원 총인원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타지역
12	1	5	6	-	8	4	-	-	12

(2) 장·단기 연수지원 성과

해당사항 없음.

(3) 산업기술인력 양성 성과

해당사항 없음.

사. 경제사회 파급효과

산업지원 성과 (단위 : 건)				고용창출 성과 (단위 : 명)		
기술지도	기술이전	기술평가	합계	창업	사업체 확장	합계
27	5		31			

○ 현재 5개의 영농법인에 기술이전을 하고 기술지도 중에 있음

- 기술이전 영농법인 : 5개소 (광양가남매실농원영농조합법인, 새싹유기영농조합법인, 생기들녘영농조합법인, 신금친환경쌀영농조합법인, 영농회사법인 농자천(유))

○ 게르마늄 농작물 재배 농가지도 : 7농가

- 전남, 경남지역의 농민과 지역 농업기술센터들로 부터 게르마늄 농작물 재배와 관련한 문의가 많이 오고 있으며 게르마늄에 대한 올바른 이해와 농작물재배관련 방법 등을 지도 하고 있음.

○ 게르마늄 농작물 게르마늄 분석지원 : 20농가

- 농민들의 가장 큰 애로사항중의 하나였던 게르마늄 농자재 재배 농작물의 정확한 게르마늄 함량 분석에 대한 지원을 하고 있음.

○ 게르마늄 농자재 제조업체의 애로사항 지원 : 4개업체

- 주요 게르마늄 농자재 제조업체와의 간담회를 통해 회사의 애로사항 해결 방안을 지원하고 고품질의 기능성 농자재 개발과 농민들에 대한 게르마늄 농자재의 정확한 사용방법 등을 지도할 수 있는 방안 등을 주기적으로 의논하고 있음.

## 2. 연구 성과활용 계획

### 가. 기대효과 및 활용방안

#### (1) 기대효과

##### (가) 기술적 측면

- 게르마늄의 식물체 흡수 전이가 쉬운 게르마늄 농자재 개발을 위한 기술력 확보
- 게르마늄함유 친환경 농자재 및 기능성농산물 생산기술 개발에 의한 토양 중 게르마늄 잔류량 감소
- 작물별 게르마늄 적정 처리농도를 구명에 의한 기능적이면서 안전한 농산물 생산기술 정립
- 농산물 내 정확한 게르마늄 분석을 시료전처리 방법과 분석기술 정립
- 게르마늄함유 기능성 농산물 생산을 위한 작부체계 확립 및 매뉴얼 작성
- 유기게르마늄함유 농산물의 동물실험을 통한 약리효과 구명

##### (나) 경제·산업적 측면

- 게르마늄 흡수 이용효율이 높은 게르마늄 농자재 개발 기술확보에 의한 기능성 식품 수요 창출
- 게르마늄함유 기능성 농산물을 브랜드화하여 농가소득 향상
- 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배기술 개발로 인해 게르마늄 농자재 구입에 대한 경비 절감.

#### (2) 활용방안

- 게르마늄함유 농산물 및 농자재 중 게르마늄 함량 분석의 문제점 개선
- 농작물 내 미량 게르마늄 분석기술 체계 정립
- 작물체내 흡수 전이가 우수한 게르마늄 농자재를 개발함으로써 게르마늄 자재 효율성 증대
- 작물별 적정 게르마늄 사용방법에 따른 유기게르마늄함유 농산물 재배기술의 농가 보급
- 게르마늄함유 기능성 농산물 생산을 위한 작부체계 확립 및 매뉴얼 작성에 활용
- 게르마늄함유 농산물의 동물실험을 통한 안전성 및 기능성 검정으로 국민보건 향상

### 나. 추가연구의 필요성

본 연구는 식물체내 흡수전이가 우수한 게르마늄함유 친환경 농자재를 개발하고, 이를 바탕으로 게르마늄함유 기능성 쌀 생산 기술을 개발하고, 게르마늄함유 기능성 채소 수경재배기술을 개발하며, 게르마늄함유 기능성 채소의 안전성 및 약리효과를 검증하고자 하였고, 최종적으로는 게르마늄함유 농산물의 기능성을 검정하여 브랜드화하고 농가소득을 향상 시키고자 하였



다. 하지만 현재 수행된 연구 결과만으로 이들 개발기술을 현장에 적용하는 것은 현장 적용성 측면에서 한계가 있을 것으로 판단된다. 특히 벼의 경우 본 연구에서 4품종의 벼에서 게르마늄 흡수 특성을 조사하였으나, 연구결과 품종별로 게르마늄 독성 범위가 달라 향후 다양한 품종에서 게르마늄 독성 범위 및 재배기술을 적용하여 최적 조건을 조사하는 연구가 추진되어야 할 것으로 판단된다. 또한 기능성 채소의 경우도 벼와 마찬가지로 3종류의 채소에만 국한된 게르마늄함유 기능성 채소 수경재배기술이므로 향후 추가연구를 통해 다양한 채소류에 적용하여 그 활용성과 적용성의 범위를 넓힐 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구는 실제 벼 재배 농가에 게르마늄함유 기능성 농산물 생산 기술을 실용화하여 보급하기 위한 목적으로 연구되어 적용성면에서는 매우 높은 가치를 가지나, 실제 게르마늄의 식물체내 흡수전이 기작, 게르마늄함유 농산물의 안정성 및 약리효과 측면에서 추가적인 세부연구가 필요할 것이다.

#### 다. 타연구에의 활용계획

본 연구는 게르마늄함유 기능성 농산물 생산기술을 개발하기 위해 곡류 중에서 벼, 엽채류 중에서 상추, 오이, 갓에 게르마늄을 시용하여 기능성 농산물 재배기술을 개발하였다. 하지만 현재 게르마늄은 다양한 곡류, 엽채류 및 과채류에 적용되고 있어 본 연구진의 기술인력과 노하우를 이용하여 다양한 농산물에 적용할 계획이다.

#### 라. 실용화, 산업화 계획

본 연구는 실제 벼 재배 농가에 게르마늄함유 기능성 농산물 생산 기술을 실용화하여 보급하기 위한 목적으로 연구되었기 때문에 개발된 재배기술을 무료로 농가에 실용화하여 보급할 계획이다. 실제 현재 5개의 영농조합법인에 기술이전협약을 하여 게르마늄 함유 매실, 쌀, 새싹채소, 토마토 등을 생산하여 브랜드화하는 프로그램을 진행하고 있다.

#### 마. 교육, 지도, 홍보 등 기술확산 계획

본 연구는 5개의 영농조합법인에 기술이전협약을 하여 게르마늄 함유 매실, 쌀, 새싹채소, 토마토 등을 생산하여 브랜드화하는 프로그램을 진행하고 있다. 또한 연구수행중에 이미 7건의 게르마늄 농작물 재배를 위해 농가를 지도하였고, 이후에도 전남, 경남지역의 농민과 지역 농업기술센터들로 부터 게르마늄 농작물 재배와 관련한 문의가 많이 오고 있으며 게르마늄에 대한 올바른 이해와 농작물재배관련 방법 등을 꾸준히 지도할 계획이다. 또한 게르마늄 농작물 중 게르마늄 분석을 문의한 20농가 18농산물에 대해 기술지원을 실시하였다. 특히 게르마늄 분석은 개발된 기술의 보급 및 점검을 위해 반드시 필요하여 본 과제 종료이후에도 꾸준히 게르마늄 농작물 재배 농작물의 게르마늄 함량 분석에 대한 지원을 할 계획이다.

#### 바. 특허, 품종, 논문 등 지식재산권 확보계획

본 연구를 통해 그동안 꾸준히 국내외 저명학술지에 논문을 게재하였고, 국내외 학술발표회

에서 다수의 연구성과를 발표하였다. 특히 본 연구결과 중 우수결과는 현재 SCI 저널에 투고 중에 있으며, 3차년도 연구결과와 전체적인 종합결과를 이용하여 국내외 저명학술지에 향후 몇 년간 꾸준히 투고하여 본 개발 기술을 홍보하고 보급할 계획이다.

## SUMMARY

This study was carried out to develop the Ge containing agricultural resources and the optimum application techniques for production of Ge containing functional crops. with development of application method for production of Ge-containing functional rice, development of hydroponics technique for production of Ge-containing vegetables, oral single-dose toxicity studies on Ge-fortified Lettuce in mouse and development of Ge containing agricultural resources.

1. The optimum pre-treatment condition for analysis of Ge containing agricultural goods.

For an accurate and efficient analyses of Ge, the use of high-tech machinery and the best pre-treatment of the samples is very important. This is because Ge is lost even at a low temperature to gases such as GeO or GeS. It also has a low boiling point (84°C), which makes it easy to volatilize. Even in this research we made a sample integration device that is capable of accurate temperature adjustment and thermal conductivity. With this device, we examined the most appropriate dissolvent, the best concentration of this dissolvent and the time it took to dissolve the a solute. We also compared the methods used to examine the feasibility of the results considering how accurate it is. Digestion with conc. HNO<sub>3</sub> showed the highest rate, with an average rate of 94.3%. When the ratio of the dissolvent was 1 : 1 (HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O) was most suitable (condition : 5 mL dissolvent, 120°C, 4 hours). The collection rate of Ge depending on the temperature decreased as the temperature got higher. Between 80–100°C the rate was steady at over 95%. However, at over 120°C the rate dropped sharply.

According to these results, optimum condition was established by adding 3mL of a dissolvent of HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O = 1 : 1 into to 0.2 g of sample and then digestion at 45°C for overnight. Afterwards, samples was added with 2 mL of the dissolvent and then additional incubated at 80°C for 4 hours. Then sample was added with 50 µL of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and then incubated for 30 more minutes. Finally, samples was diluted by 10 mL of high pure water before ICP-MS analysis.

## 2. Development of Application Method for Production of Ge-contained Functional Rice.

### 2.1. Development of Application Method for Production of Ge-contained Functional Rice.

To develop the germanium (Ge) application method for production of functional rice, we investigated the Ge contents from cereals, vegetables and fruits. We also investigated the toxicity properties of Ge by examining the growth characteristics with several different conditions, such as different application methods and different concentrations etc. Although germanium contents of germanium-contained agricultural products was slightly high in the order cereals > vegetables > fruits, there was not much big differences in compared to those of control. Therefore, germanium (Ge) application method might be developed to produce the Ge-contained rice and to examine the Ge contents in rice.

To obtain the basic information for agricultural utilization of Ge, the growth characteristics and Ge adsorption of rice plant were investigated with different Ge concentration in soil. As higher the Ge concentration in soil, the yields of rice were decreased by increasing the phytotoxicity of Ge. Because the phytotoxicity of Ge was observed with above 8 mg kg<sup>-1</sup> treatment, thus less amount of Ge than 8 mg kg<sup>-1</sup> should be applied for rice growth.

The Ge contents in rice was high in order of leaf > stem > root. When rice plant was cultivated on soil supplemented with 12 mg kg<sup>-1</sup> of Ge, Ge content in leaf, stem and root was 254, 87.6 and 0.2 mg kg<sup>-1</sup>, respectively. The Ge contents in rice grains was high in order of rice bran > brown rice > polished rice.

The Ge contents in rice by foliar spray application was high in order of leaf > stem > root. The Ge contents in rice by the numbers of foliar spray application was high in order of 3 times ≫ 2 times ≐ 1 times. When rice plant was treated with 3 times of Ge, Ge contents in rice grains was high in order of rice bran ≫ brown rice > polished rice.

### 2.2. The Selection of Optimum Rice Species and Germanium Application Method for Production of Functional Rice with Germanium

To select of optimum rice species and germanium (Ge) application method for production of functional rice with Ge, the growth characteristics, Ge absorption and grain quality of rice plant were investigated under different rice species (Hopyungbyeo, Junambyeo, Ilmeebyeo and Dongjinbyeo) and Ge application method (soil application and foliar spray). The rice yield by soil application was higher in the order of Hopyungbyeo ≐ Junambyeo

> Ilmeebyeo ≫ Dongjinbyeo. On the other hand, the rice yield by foliar spray was higher in the order of Junambyeo ≫ Ilmeebyeo > Dongjinbyeo > Hopyungbyeo. The rice yield by soil application was higher than that by foliar spray regardless of rice species. For soil application, the Ge absorption in various parts of the rice was higher in the order of rice bran > brown rice > polished rice regardless of rice species. The Ge absorption of brown rice in Hopyungbyeo, Ilmeebyeo, Dongjinbyeo and Junambyeo by soil application was 14.5, 8.0, 11.6 and 10.4 mg kg<sup>-1</sup>, respectively. For foliar spray application, the Ge absorption of brown rice in Hopyungbyeo, Ilmeebyeo, Dongjinbyeo and Junambyeo by soil application was 14.5, 11.8, 11.8 and 12.9 mg kg<sup>-1</sup>, respectively. In leaf, stem and root, the Ge absorption by foliar spray was higher than that by soil application, whereas, in rice bran, brown rice and polished rice, the Ge absorption by soil application was higher than that by foliar spray. The optimum rice species and Ge application method were demonstrated to be Hopyungbyeo and soil application, respectively, which provided suitable conditions for production of functional rice with Ge.

The growth characteristics and germanium (ge) uptake of rice plant (Hopyungbyo) on soil with Ge were investigated under different soil textures to obtain the basic information for agricultural utilization of Ge. This study was carried out in the Wagner pot. Ge concentration in soils such as clay loam, silt loam, loam and sandy loam for rice plant cultivation was treated at 8 mg kg<sup>-1</sup>. The growth status of rice plant was almost similar in all soil texture, and rice yield was higher in the order of slit loam > clay loam > loam > sandy loam. In rice brain, the Ge uptakes in silt loam, clay loam, loam and sandy loam were 980, 868, 754 and 803 ug pot<sup>-1</sup>, respectively. The Ge uptakes of brown rice and polish rice were greater in the order of silt loam > sandy loam > clay loam > loam. In silt loam, the Ge uptake rates in leaf, stem, root, rice brain and brown rice were 19.7, 2.3, 0.03 and 0.44%, respectively. Therefore, under the given experimental condition the optimum soil texture for production of functional rice with Ge is a silt loam.

To select the optimum application method, growth and yields were identified with higher in order of soil application > soil + foliar spray ≅ foliar spray. In rice bran, Ge contents was high with soil application and in brown rice, Ge contents with soil application, soil + foliar spray and foliar spray were 140, 91, 146 µg pot<sup>-1</sup>, respectively. Therefore, under the given experimental condition the optimum application for production of functional rice with Ge is soil application.

Based on these results, the optimum rice species, soil texture, application method, kind of Ge and number of treatment for production of Ge contained functional rice was Hopyungbyeo, silt loam, soil application, inorganic GeO<sub>2</sub>, and 3 times, respectively. Ge

treatment in soil application was much better with adding  $8 \text{ mg kg}^{-1}$  before planting of rice. Furthermore, brown rice is better than polished rice for intake the organic Ge into human and processed foods containing the rice bran would be applied.

### 2.3. Verification of agricultural resources of germanium and utilities of application techniques for Ge-contained Functional Rice

Based on earlier results about optimum species, soil texture and application method, we applied the developed techniques into field experiment and verified the Ge containing agricultural resources in rice cultivation using commercial Ge and  $\text{GeO}_2$ .

Plant length was shorter in  $\text{GeO}_2$  than in commercial Ge treatment or Control. Phytotoxicity was detected in  $\text{GeO}_2$  but not in commercial Ge treatment. The grain yield was high in order of Control > Commercial Ge >  $\text{GeO}_2$ . The dry weight was high in order of Control >  $\text{GeO}_2$  > commercial Ge. The Ge contents in leaf under  $\text{GeO}_2$  was 6 times ( $177 \text{ mg m}^{-2}$ ) more than those under commercial Ge. Ge contents in rice bran was not much different in all treatment conditions. Ge contents in brown rice were 40.9 and 31.1  $\text{mg kg}^{-1}$  with  $\text{GeO}_2$  and commercial Ge, respectively.

Ge absorption rates in rice plant was high in order of leaf > rice brain > brown rice > stem > root. Under  $\text{GeO}_2$ , 15.56% of Ge was uptaken into plant with 11.1% in leaf, 1.6% in stem, 0.03% in root, 2.2% in rice brain and 0.73% in brown rice. Under commercial Ge treatment, 5.19% of Ge was uptaken into plant with 1.8% in leaf, 0.46% in stem, 0.01% in root, 2.2% in rice brain and 0.71% in brown rice.

Based on these results, Ge contents in polished rice was high in commercial Ge treatment than in  $\text{GeO}_2$  treatment. However, Ge contents in rice grain (containing rice brain and polished rice) were in  $\text{GeO}_2$  treatment than in commercial Ge treatment. In case of  $\text{GeO}_2$  treatment, phototoxicity in rice growth was much high. Considering the rice growth and Ge contents, treatment with commercial Ge is much better than  $\text{GeO}_2$ .

### 3. Development of hydroponics technique for production of Ge containing vegetables.

#### 3.1. Uptake Properties of Germanium to Vegetable Plants and Its Effect on Seed Germination and on Early Stage Growth.

To investigate effects of inorganic ( $\text{GeO}_2$ ) and organic ( $\text{Ge-132}$ ) germanium (Ge) on seed germination and on early stage growth of plants and the uptake characteristics, various concentrations (0, 10, 25, 50 and  $100 \text{ mg L}^{-1}$ ) of Ge to popular vegetables such as leaf mustard, chinese cabbage and pak-choi, respectively, were treated. On seed germination, no significant effect was observed in both inorganic and organic Ge treatments except  $100 \text{ mg L}^{-1}$  treatment of inorganic Ge. Exogenous inorganic Ge ( $10\text{--}100 \text{ mg L}^{-1}$ ) treatments significantly inhibited the early root elongation growth of all plants. However, slight enhancement of early shoot elongation was detected in low concentrations (10 and  $25 \text{ mg L}^{-1}$ ) of Ge in the leaf mustard and chinese cabbage plants. Organic Ge treatments significantly stimulated the root and shoot growth at the 10, 25 and  $50 \text{ mg L}^{-1}$  treatments. Ge was accumulated linearly in the vegetables as both inorganic and organic Ge concentrations were increased. Interestingly, total contents of Ge in plants with  $\text{Ge-132}$  treatments were 2–4.5 times more than those with inorganic Ge treatments in all concentrations. At  $25 \text{ mg L}^{-1}$  treatment of Ge, contents of Ge in vegetables are following: in leaf mustard, inorganic Ge:  $0.37 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$  and organic Ge:  $1.47 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$ ; in the chinese cabbage, inorganic Ge:  $0.4 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$  and organic Ge:  $0.86 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$ ; in the pak-choi, inorganic Ge:  $0.33 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$  and organic Ge:  $0.70 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$ , respectively. These results showed organic Ge is much better on early stage seedling growth and on germanium accumulation of vegetables than inorganic Ge.

#### 3.2. Development of hydroponics technique for production of Ge containing Lettuce.

To investigate the effect of inorganic ( $\text{GeO}_2$ ) and organic ( $\text{Ge-132}$ ) germanium treatment on early lettuce seedling, growth characteristics and Ge contents were examined with various inorganic or organic germanium treatments (0, 5, 10, 25, 50 and  $100 \text{ mg L}^{-1}$ ) for 7 days, respectively. Lettuce seedlings growth didn't much inhibited until 10 and  $25 \text{ mg L}^{-1}$  concentration under  $\text{Ge-132}$  treatment in compared to control. However, lettuce seedling under  $\text{GeO}_2$  treatment was significantly inhibited at 10 and  $25 \text{ mg L}^{-1}$  concentration compared to control. At 50 and  $100 \text{ mg L}^{-1}$  conditions, lettuce seedlings were severely inhibited under both  $\text{GeO}_2$  and  $\text{Ge-132}$  treatments. To determine the effect of Ge on lettuce

growth in detail, plant length and fresh weight were measured under  $\text{GeO}_2$  or Ge-132 treatments, respectively. Under treatment of  $\text{GeO}_2$ , plant length was significantly inhibited with all concentration of  $\text{GeO}_2$  treatment. At  $10 \text{ mg L}^{-1}$  of  $\text{GeO}_2$  treatments, more than 50% was inhibited compared to control. Fresh weight of lettuce seedling also showed significant inhibition by treatment of  $\text{GeO}_2$ . More than 50% and 70% of fresh weight was inhibited at 10 and  $50 \text{ mg L}^{-1}$  of  $\text{GeO}_2$  treatment in compared to control, respectively. However, unlike  $\text{GeO}_2$  treatment, plant length and fresh weight were not much inhibited even until  $25 \text{ mg L}^{-1}$  concentration of Ge-132 treatment. These results suggested that Ge-132 treatment was not much toxic on lettuce seedling growth at low concentration ( $10 \text{ mg L}^{-1}$ ) although Ge-132 would be toxic to plant growth at high concentration, but  $\text{GeO}_2$  is much toxic to plant growth. Total Ge contents in lettuce early seedlings were much highly accumulated under Ge-132 treatment in compared to those of  $\text{GeO}_2$  treatment. Ge contents under both  $\text{GeO}_2$  and Ge-132 treatment were also linearly accumulated in lettuce seedlings from 5 to  $100 \text{ mg L}^{-1}$ .

For further analysis to see the effect of Ge on mature lettuce growth and its accumulation, 2 week-old lettuce plants were treated with various  $\text{GeO}_2$  or Ge-132 solutions (0, 2.5, 5, 10, 25 and  $50 \text{ mg L}^{-1}$ ) for 14 days under hydroponics cultures and then growth characteristics including fresh weight and plant length were measured. The growth of mature lettuce was significantly inhibited under  $\text{GeO}_2$  treatment, but not much inhibited at  $10 \text{ mg L}^{-1}$  under Ge-132 treatment, although lettuce growth would be significantly inhibited at high concentration (25 and  $50 \text{ mg L}^{-1}$ ) under Ge-132 treatment.

To compare the different effect between inorganic and organic germanium on lettuce growth and to establish the upper critical toxic level of  $\text{GeO}_2$  and Ge-132 treatment, we measured the shoot length, root length and fresh weight with various treatment (0, 2.5, 5, 10, 25 and  $50 \text{ mg L}^{-1}$ ) of Ge. At low level ( $2.5 \text{ mg L}^{-1}$ ) of  $\text{GeO}_2$  treatment, growth characteristics were not much inhibited compared to control. However, at  $5 \text{ mg L}^{-1}$  of  $\text{GeO}_2$  treatment, growth characteristics were shown to be significantly inhibited compared to control. At  $25 \text{ mg L}^{-1}$  of  $\text{GeO}_2$  treatment, more than 50%, 40% and 70% inhibition were observed in shoot length, root length and total fresh weight, respectively. However, under Ge-132 treatment, growth characteristics were not much different compared to control until  $10 \text{ mg L}^{-1}$  of Ge-132 treatment. Ge-132 treatment with  $25 \text{ mg L}^{-1}$  concentration slightly inhibited the lettuce growth. These results showed  $\text{GeO}_2$  treatment inhibited lettuce growth even at  $5 \text{ mg L}^{-1}$ , whereas Ge-132 treatment didn't much inhibit the lettuce growth until  $10 \text{ mg L}^{-1}$ , suggesting that inorganic germanium is more toxic than organic germanium in lettuce growth. Upper critical toxic levels would be between 2.5 and  $5 \text{ mg L}^{-1}$  under  $\text{GeO}_2$



treatments and between 10 and 25 mg L<sup>-1</sup> under Ge-132 treatments for lettuce growth.

To determine the properties of Ge accumulation and distribution between GeO<sub>2</sub> and Ge-132 treatment, we fractionated lettuce samples into shoot and root part and then measured Ge contents. Ge was highly accumulated in roots at low level (below 10 mg L<sup>-1</sup>) and in shoots at high level (above 25 mg L<sup>-1</sup>) under GeO<sub>2</sub> treatments. However, Ge was primarily accumulated in roots under all Ge-132 treatments, suggesting that GeO<sub>2</sub> may be easily transported from root to shoot by xylem loading after uptake by root system from solution, but Ge-132 may be hard to transport from root to shoot by xylem loading because Ge-132 may act as organic compounds in plant. Accumulated Ge amounts under GeO<sub>2</sub> treatment were 0.72 mg g<sup>-1</sup> DW in roots and 0.27 mg g<sup>-1</sup> DW in shoots at 10 mg L<sup>-1</sup> conditions. At 50 mg L<sup>-1</sup> of GeO<sub>2</sub> treatment, Ge contents were 0.77 mg g<sup>-1</sup> DW in root and 1.58 mg g<sup>-1</sup> DW in shoot, respectively. Total Ge amounts in plant under 50 mg L<sup>-1</sup> condition were highly observed (~2 fold) in Ge-132 treatment compared to in GeO<sub>2</sub> treatment.

For further analysis to see the different distribution in detail, we treated the lettuce with 10 mg L<sup>-1</sup> of GeO<sub>2</sub> and Ge-132 for 2 weeks, fractionated the lettuce seedlings into several fractions, such as young leaves, old leaves, stem, primary roots and lateral roots, and then measured the Ge contents. Ge was primarily accumulated at lateral and primary roots under both GeO<sub>2</sub> and Ge-132 treatment.

### 3.3. Development of hydroponics technique for production of Ge containing cucumber plant.

To investigate the effect of GeO<sub>2</sub> and Ge-132 treatment on cucumber early seedling growth, growth characteristics and contents of Ge were examined under treatment with various concentrations (0, 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 15 and 20 mg L<sup>-1</sup> on 2 weeks grown seedlings) for 14 days, respectively. Cucumber seedlings didn't show much different compared to control until 5 mg L<sup>-1</sup> concentration of GeO<sub>2</sub> treatment and then cucumber seedlings showed the necrosis phenotype in leaves under treatment with more than 10 mg L<sup>-1</sup> concentration of GeO<sub>2</sub> treatment. Under organic germanium (Ge-132) treatment, cucumber seedling didn't show any inhibition with all concentrations of exogenous treatment.

To determine the effect on growth characteristics in detail, length of root and shoot, fresh weight and total chlorophyll contents were measured under GeO<sub>2</sub> or Ge-132 treatments, respectively. Under treatment of GeO<sub>2</sub>, length of root slightly increased until 2.5 mg L<sup>-1</sup> concentration and then significantly inhibited from 5 mg L<sup>-1</sup> concentration of GeO<sub>2</sub> treatment (around 20–25% inhibition). Length of shoot and fresh weight of cucumber

seedling showed the significant inhibition by adding of  $\text{GeO}_2$ . Fresh weight was reduced more than 35% at  $10 \text{ mg L}^{-1}$  treatment of  $\text{GeO}_2$  and was reduced more than 80% at  $20 \text{ mg L}^{-1}$  concentration of  $\text{GeO}_2$  treatment in compared to control. Total chlorophyll contents also showed similar inhibition. However, unlike  $\text{GeO}_2$  treatment, length of root and shoot, fresh weight and total chlorophyll contents were not much inhibited even until  $20 \text{ mg L}^{-1}$  concentration of Ge-132 treatment. Furthermore, growth of root was significantly stimulated at low conc. ( $1\text{--}5 \text{ mg L}^{-1}$ ) treatment of Ge-132. Recently, there was reported that several vegetables, such as leaf mustard, Chinese cabbage and pak-choi, could be affected on their seed germination and on plant seedling growth. Ge-132 treatment didn't inhibit the seed germination and seedling growth, whereas  $\text{GeO}_2$  may be toxic to plant growth. These results are very similar to our results so that Ge-132 would be much better than  $\text{GeO}_2$  for growth of most vegetables.

Total Ge contents in cucumber early seedlings with  $\text{GeO}_2$  treatment were accumulated two times more than those with Ge-132 treatment. Ge was linearly accumulated in the tissues of cucumber seedlings, as the  $\text{GeO}_2$  or Ge-132 concentration in the nutrient solution increased from  $1.0$  to  $20 \text{ mg L}^{-1}$ . In addition, Ge was primarily accumulated in the roots (90%) with organic Ge (Ge-132) treatments, whereas Ge was primarily accumulated in the leaf and stem (40%, respectively) with  $\text{GeO}_2$  treatments, suggesting that Ge-132 was hardly moved from root to shoot.

For further analysis to see the effect of Ge on mature cucumber growth and accumulation of Ge, we treated the  $\text{GeO}_2$  or Ge-132 treatment solution (final  $10 \text{ mg L}^{-1}$ ) for 60 days and then measured the growth characteristics of both plant and cucumber fruits including fresh weight and length etc. Shoot and root length as well as total fresh weight were significantly inhibited under  $\text{GeO}_2$  treatment. About 50% inhibition of shoot length, 40% inhibition of root length and 75% inhibition of total fresh weight were observed in treatment of  $\text{GeO}_2$ . However, under Ge-132 treatment, analysis of growth characteristics didn't show much difference compared to control. These results are similar to those of early seedling. Length and weight of cucumber fruits also significantly inhibited by treatment of  $\text{GeO}_2$ , but not much inhibited by treatment of Ge-132. Under treatment of  $\text{GeO}_2$ , length and weight of fruits were inhibited by 60% and 80% compared to control, respectively. However, under Ge-132 treatment, weight of fruits was much more 20% than control although length of fruits didn't show much difference. These results showed  $\text{GeO}_2$  treatment inhibited plant growth and yield of cucumber, whereas Ge-132 treatment slightly stimulated the plant growth and yield.

To determine the accumulation and distribution of Ge under  $\text{GeO}_2$  and Ge-132 treatment,

respectively, we fractionated samples into fruit, leaf, petiole, stem and root part from 60 day-treated plants and then measured Ge contents. In part of fruits, we fractionated samples into stalk, rind, pulp and seeds to see the different distribution of Ge in fruits. Total Ge contents were highly observed (2.7 fold) in  $\text{GeO}_2$  treatment compared to Ge-132 treatment. Under treatment of  $\text{GeO}_2$ , most of Ge contents were observed in leaf (27%), petiole (39%) and stem (30%), but around 3% of Ge contents were observed in fruit and root part, respectively. Unlike  $\text{GeO}_2$  treatment, more than 90% of Ge contents were accumulated in root section, suggesting that  $\text{GeO}_2$  may be easily transported from root to shoot by xylem loading but Ge-132 may be hard to transport from root to shoot after uptake of Ge from solution. Accumulation of Ge in fruits under both  $\text{GeO}_2$  and Ge-132 treatment is much high in order by stalk > rind > pulp > seeds. These results suggest that accumulation of Ge may be happened based on the distance from xylem of stem because of their transport from root to shoot.

#### 3.4. Development of hydroponics technique for production of Ge containing leaf mustard plant.

To investigate the effect of inorganic ( $\text{GeO}_2$ ) and organic (Ge-132) germanium treatment on leaf mustard plant, growth characteristics and Ge contents were examined with various inorganic or organic germanium treatments (0, 5, 10, 25, 50 and 100 mg L<sup>-1</sup>), respectively. Leaf mustard growth didn't much inhibited until 10 mg L<sup>-1</sup> concentration under both Ge-132 and  $\text{GeO}_2$  treatment in compared to control. To determine the effect of Ge on leaf mustard growth in detail, plant length and fresh weight were measured under  $\text{GeO}_2$  or Ge-132 treatments, respectively. Under treatment of  $\text{GeO}_2$ , length of root and shoot slightly increased until 5 mg L<sup>-1</sup> concentration and dry weight slightly increased until 10 mg L<sup>-1</sup> concentration. Under treatment of Ge-132, length of root and shoot slightly increased until 10 mg L<sup>-1</sup> concentration and dry weight slightly increased until 25 mg L<sup>-1</sup> concentration. Total Ge contents in leaf mustard early seedlings with  $\text{GeO}_2$  treatment were a bit higher than those with Ge-132 treatment. Ge was linearly accumulated in the tissues of plant seedlings, as the  $\text{GeO}_2$  or Ge-132 concentration in the nutrient solution increased from 1.0 to 20 mg L<sup>-1</sup>. In addition, Ge was primarily accumulated in the roots (77%) with organic Ge (Ge-132) treatments, whereas Ge was primarily accumulated in the leaf (70%, respectively) with  $\text{GeO}_2$  treatments.

The Ge uptake rates in inorganic Ge treatment was slightly high in compare to those in organic Ge treatment. Under inorganic Ge treatment with 2.5 mg L<sup>-1</sup>, about 3% of Ge

was accumulated into plant and distribution in leaf and root was 84.8% and 15.2%, respectively. Under organic Ge treatment with 2.5 mg L<sup>-1</sup>, about 2.6% of Ge was accumulated into plant and distribution in leaf and root was 66.3% and 33.4%, respectively.

To select the optimum application method, leaf mustard growth and uptake properties were determined. Under Ge-132 treatment, there was not much differences in plant growth. However, under inorganic Ge treatment, plant growth was not much difference until 12 mg L<sup>-1</sup> and then inhibited at 24 mg L<sup>-1</sup> treatment.

Based on these results, the optimum condition for production of Ge-containing leaf mustard was inorganic GeO<sub>2</sub>, and 1 times treatment after planting with 12 mg L<sup>-1</sup> conc, respectively.

#### 4. Oral Single-dose Toxicity Studies on Germanium-fortified Lettuce, in Mouse

##### 4.1. Oral Single-dose Toxicity Studies on Germanium-fortified Lettuce, in Mice

Single-dose toxicity test of germanium-fortified lettuce was investigated in mice. Both sexes of C57BL/6 mice were orally administered once at a dose of 2,000 mg kg<sup>-1</sup>. No death, clinical signs and pathological findings related to the treatment were observed. In addition, no significant changes in feed consumption and body weight gain were obtained during the treatment period, in spite of day-to-day fluctuation of water consumption. There were no considerable changes in hematology and serum biochemistry, except a significant decrease in GPT, GOT and LDH. Several alterations were observed in organ weight and blood biochemistry, including thymus, ovaries, heart, kidney and platelet in male or female mice. The ability of spleen cells proliferation was almost same level as shown in control group. However the population of B cells, helper T cells and cytotoxic T cells was not comparably changed in all groups. Taken together, it is suggested that single oral dose of germanium-fortified lettuce to C57BL/6 mice did not cause apparent toxicological change at the dose of 2,000 mg kg<sup>-1</sup> body weight.

##### 4.2. Oral repeated-dose Toxicity Studies on Germanium-fortified Lettuce, in Mice

Thirteen-week repeated-dose toxicity test of germanium-fortified lettuce was investigated in mice. Both sexes of C57BL/6 mice were orally administered daily for 13 week at a dose of 500 mg kg<sup>-1</sup> in repeated-dose toxicity tests. No death, clinical signs and pathological findings related to the treatment were observed. In addition, no significant changes in body

weight gain were obtained during the treatment period, except a slight decrease in feed and water consumption in female mice. Several alterations were observed in organ weight, including thymus, heart brain and kidney in male or female mice. There were no considerable changes in hematology and serum biochemistry. The ability of spleen cells proliferation was almost same level as shown in control group. However the population of B cells, helper T cells and cytotoxic T cells was not comparably changed in all groups. Furthermore  $\text{GeO}_2$ -lettuce administration suppressed progression of tumor in mice. Taken together, it is suggested that repeated oral dose of germanium-fortified lettuce to C57BL/6 mice did not cause apparent toxicological change at the dose of  $500 \text{ mg kg}^{-1}$  body weight.

#### 5. The development of environmental friendly agricultural resources that contain Ge.

To develop the Ge-containing environmental friendly agricultural resources, we produced the commercial products based on the solubility and stability of Ge in solution. The  $\text{GeO}_2$  that is commonly used as an ingredient of Ge resources has a very low solubility, so the gaining of an efficient and economical dissolving technique is very important. During this experiment, we examined the solubility of  $\text{GeO}_2$  using many kinds of acids and alkalis and water as a dissolvent and we found out that when using an alkali, it was most efficient when the alkalis were mixed at a ratio of 2 : 1.

The mixing ratio of Ge and a dissolvent was most desirable when the content of Ge was low. Generally, the solubility was high when mixed at a ratio of 100:0.1-10 and was most economical at a ratio of 100 : 1. The dissolving of Ge was very sensitive to temperature and of between  $35-120^\circ\text{C}$ , between  $90-98^\circ\text{C}$  was most efficient, and a temperature of  $95^\circ\text{C}$  had the best result. After stirring the mixed liquid for 3 hours out of 30 minutes-24 hours, you can get a Ge solution.

Because there is a chance of the dissolved inorganic Ge to crystallize depending on the surrounding conditions, we examined plans to stabilize this. To stabilize inorganic Ge, control the solution's pH level to between 7.0-7.5 is efficient, and then NaOH was added with a ratio of 1 : 0.5-2.

Based on the above results, we made a liquid Ge fertilizer that remains stable during a change in the environment and the made sold Ge fertilizer.

Currently, we are examining many condition to increase the uptake efficiency of Ge, and through one plan, we found a way to make the Ge into nano-sized particle, and in a few basic tests, we found this increased the uptake efficiency greatly. Currently, this technology is being developed together with NANO PLEX Inc.



# CONTENTS

SUMMARY .....	33
CONTENTS .....	45
<b>Chapter 1. Outline of Research Program</b> .....	59
<b>Chapter 2. Current Status of This Research Program</b> .....	64
Section 1. Current Natural Purification in Korea .....	73
Section 2. Materials and Methods .....	76
<b>Chapter 3. Investigation and Results</b> .....	78
Section 1. Optimum pre-treatment condition for analysis of Ge-containing sample .....	87
1. Introductionc .....	78
2. Development of digestion device .....	78
3. Determination of Ge amounts .....	79
4. Recovery rate of Germanium .....	80
5. Recovery rate of Ge with HNO <sub>3</sub> concentration .....	81
6. Recovery rate of Ge with temperature .....	81
7. Optimum condition for analysis of Ge .....	82
8. Summary .....	82
Section 2. Development of application method for production of Ge-contained functional rice .....	84
I. Development of application method for production of Ge-contained functional rice	84
1. Materials and Methods .....	84
2. Results and Discussion .....	88
3. Summary .....	127
II. Development of cultivation methods for enhancement of Ge uptake .....	130
1. Materials and Method .....	130
2. Results and discussions .....	138
3. Summary .....	189

III. Verification of agricultural resources of germanium and utilities of application techniques for Ge-contained Functional Rice .....	198
1. Materials and Method .....	193
2. Results and discussion .....	197
3. Summary .....	210
IV. Rice cultivation manuals for production of Ge-contained functional rice .....	212
1. Selection of optimum rice species .....	212
2. Selection of optimum soil texture .....	214
3. Soil application of Ge .....	215
4. Foliar spray application of Ge .....	216
5. Management of rice cultivation .....	219
6. Phytotoxicity of Ge .....	225
Section 3. Development of hydroponics technique for production of Ge containing vegetables .....	229
I. Uptake Properties of Germanium to Vegetable Plants and Its Effect on Seed Germination and on Early Stage Growth .....	229
1. Materials and Methods .....	229
2. Effects of Ge on seed germination and early seedlings growth .....	230
3. Effects of Se on seed germination and early seedlings growth .....	237
4. Summary .....	241
II. Development of hydroponics technique for production of Ge containing Lettuce. ....	243
1. Materials .....	243
2. Method of lettuce growth .....	243
3. Treatment of Ge .....	243
4. Analysis of growth characteristics .....	244
5. Analysis of Ge in plant .....	244
6. Examination of Ge stability in solution .....	244
7. Growth characteristics and Ge uptake in hydroponic cultures .....	247
8. Determination of Ge-phytotoxicity conc in lettuce. ....	249
9. Determination of optimum Ge conc. ....	252
10. Ge uptake and distribution in lettuce .....	259
11. Summary .....	262



III. Development of hydriponics technique for production of Ge containing cucumber plant .....	265
1. Materials and Methods .....	265
2. Analysis of Ge in plant .....	266
3. Determination of Ge–phytotoxicity conc in cucumber .....	26
4. Determination of optimum Ge treatment and Ge transport under hydroponics .....	28
5. Determination of optimum Ge treatment and Ge transport under soil condition .....	32
6. Determination of optimum number of Ge treatment .....	310
7. Summary .....	317
IV. Development of hydriponics technique for production of Ge containing leaf mustard plant .....	322
1. Materials and Methods .....	322
2. Analysis of Ge in plant .....	323
3. Determination of Ge–phytotoxicity conc in leaf mustard. ....	33
4. Determination of optimum Ge treatment and Ge transport under hydroponics .....	333
5. Summary .....	347
Section 4. Toxicity Studies on Germanium–fortified Lettuce .....	39
I. Oral Single–dose Toxicity Studies on Germanium–fortified Lettuce, in Mice .....	9
1. Materials and methods .....	349
2. Analysis of toxicity .....	349
3. Results .....	351
4. Summary .....	369
II. Oral repeated–dose toxicity studies on Ge–fortified lettuce in mice .....	13
1. Materials and methods .....	371
2. Analysis of toxicity .....	371
3. Results .....	373
4. Summary .....	394
Section5. The development of Ge–contained environmental friendly agricultural resources .....	395
<b>Chapter 4. Accomplishment and Major Contribution .....</b>	<b>421</b>

Chapter 5. Application Plan of the Research ..... 423

Chapter 6. Information Obtained Oversea during Research ..... 431

Chapter 7. Reference ..... 433

# 목 차

제 출 문 .....	1
요 약 문 .....	3
SUMMARY .....	33
CONTENTS .....	45
<b>제 1 장 연구개발과제의 개요</b> .....	<b>59</b>
<b>제 2 장 국내외 기술개발 현황</b> .....	<b>61</b>
제 1 절 국내의 기술개발 현황 .....	73
제 2 절 국외의 기술개발 현황 .....	76
<b>제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과</b> .....	<b>78</b>
제 1 절 농산물중 게르마늄 함량 분석을 위한 시료 전처리 최적화 방안 .....	78
1. 서론 .....	78
2. 시료분해장치 제작 .....	78
3. 게르마늄 정량 .....	79
4. 분해액 종류별 게르마늄 회수율 검토 .....	80
5. 분해용액 (HNO <sub>3</sub> ) 농도별 게르마늄 회수율 검토 .....	81
6. 분해온도에 따른 게르마늄 회수율 검토 .....	81
7. 식물체 내 게르마늄 최적 분석조건 .....	82
8. 연구결과 요약 .....	82
제 2 절 게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술 개발 .....	84
I. 게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술 개발 .....	84
1. 재료 및 방법 .....	84
가. 공시 재료 .....	84
나. 실험방법 .....	84
(1) 유통중인 게르마늄 함유 농산물 중 게르마늄 함량조사 .....	84
(2) 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술 개발 .....	85
(가) 벼의 게르마늄 토양처리시 생육촉진 및 독성발생범위 구명 .....	85
(나) 벼의 게르마늄 엽면살포시 생육촉진 및 독성발생범위 구명 .....	86
다. 조사시기 .....	88
라. 분석방법 .....	88
2. 결과 및 고찰 .....	88
가. 유통중인 게르마늄 함유 농산물 중 게르마늄 함량조사 .....	88
(1) 곡류중의 게르마늄 함량조사 .....	88

(2) 엽채류중의 게르마늄 함량조사 .....	89
(3) 과채류중의 게르마늄 함량조사 .....	90
나. 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술개발 .....	91
(1) 벼의 게르마늄 토양처리시 생육촉진 및 독성발생범위 구명 .....	91
(가) 게르마늄 토양처리 농도별 게르마늄 흡수 특성 .....	91
(나) 게르마늄 종류별 토양처리시 게르마늄 흡수 특성 .....	100
(2) 벼 생육시기별 게르마늄 엽면살포시 생육촉진 및 독성발생범위 구명 .....	108
(가) 게르마늄 엽면처리 농도별 게르마늄 흡수 특성 .....	108
(나) 게르마늄 엽면 처리농도별 게르마늄 흡수 특성 .....	114
(다) 게르마늄 종류별 엽면처리시 게르마늄 흡수 특성 .....	120
3. 연구결과 요약 .....	127
II. 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배법 개발 .....	130
1. 재료 및 방법 .....	130
가. 공시재료 .....	130
나. 실험방법 .....	131
(1) 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 구명 .....	131
(가) 벼 품종별 벼의 생육특성 .....	132
(나) 벼 품종별 토양 중 무기성분 함량 변화 .....	132
(다) 벼 품종에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성 .....	132
(라) 벼 품종에 따른 쌀 미질 특성 .....	132
(마) 최적 품종 선정 .....	133
(2) 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배조건 구명 .....	133
(가) 토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성 구명 .....	133
(나) 게르마늄 처리방법별 벼의 게르마늄 흡수 특성 구명 .....	134
(다) 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 게르마늄 흡수 특성 구명 .....	137
다. 조사시기 .....	137
라. 분석방법 .....	138
2. 결과 및 고찰 .....	138
가. 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 구명 .....	138
(1) 벼 품종별 벼의 생육특성 .....	139
(2) 벼 품종별 토양 중 무기성분 함량 변화 .....	144
(3) 벼 품종에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성 .....	144
(4) 벼 품종에 따른 쌀 미질 특성 .....	157
(5) 최적 품종 선정 .....	158
나. 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배조건 구명 .....	159

(1) 토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성 구명 .....	159
(2) 게르마늄 처리방법별 벼의 게르마늄 흡수 특성 구명 .....	168
(3) 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 게르마늄 흡수 특성 구명 .....	177
3. 연구결과 요약 .....	189
III. 개발된 게르마늄 농자재 효과검정 및 기능성 쌀 생산기술 실용화 .....	193
1. 재료 및 방법 .....	193
가. 공시재료 .....	193
나. 실험방법 .....	194
(1) 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육특성 .....	195
(2) 게르마늄 종류에 따른 토양 중 무기성분 함량 변화 .....	195
(3) 게르마늄 종류에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성 .....	195
(4) 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 쌀 미질 특성 .....	195
(5) 게르마늄 종류에 따른 게르마늄 쌀 품질 비교 .....	195
다. 조사시기 .....	195
라. 분석방법 .....	196
2. 결과 및 고찰 .....	197
가. 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육특성 .....	197
나. 게르마늄 종류에 따른 토양 중 무기성분 함량 변화 .....	202
다. 게르마늄 종류에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성 .....	203
라. 게르마늄 종류에 따른 쌀 미질 특성 .....	208
마. 게르마늄 종류에 따른 게르마늄 쌀 품질 비교 .....	209
3. 연구결과 요약 .....	210
IV. 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 벼재배 매뉴얼 .....	212
1. 벼 품종 선정 .....	212
가. 엽면처리시 벼 품종 선정 .....	212
나. 토양처리시 벼 품종 선정 .....	213
2. 토성 선정 .....	214
3. 게르마늄 토양처리 방법 .....	215
가. 게르마늄 처리농도 .....	215
나. 게르마늄 종류별 .....	215
4. 게르마늄 엽면처리 방법 .....	216
가. 게르마늄 처리농도 .....	216
나. 게르마늄 처리횟수 .....	217
다. 게르마늄 종류별 .....	217
5. 재배관리 .....	217

가. 게르마늄 처리방법 .....	219
나. 게르마늄 처리횟수 .....	219
다. 물관리 .....	220
(1) 활착기의 물관리 .....	220
(2) 분얼기의 물관리 .....	220
(3) 무효분얼기와 중간낙수 .....	221
(4) 수잉기 전·후의 물관리 .....	222
(5) 출수기 전·후의 물관리 .....	222
(6) 물떼기 .....	223
라. 온도 .....	223
마. 광 관리 .....	224
6. 게르마늄 독성관리 .....	225
가. 벼의 게르마늄 독성 .....	225
나. 규소와 게르마늄의 관계 .....	227
다. 규산질비료 .....	227
(1) 규산질비료 시용 효과 .....	227
(2) 규산질비료의 종류 .....	228
(가) 규회석비료 .....	228
(나) 규산질비료 .....	228
제 3 절 게르마늄함유 기능성 채소 수경재배기술 개발 .....	229
I. 게르마늄과 셀레늄이 채소종자발아 및 유묘생장에 미치는 영향 .....	229
1. 연구내용 및 방법 .....	229
가. 공시채소종자 .....	229
나. 게르마늄 및 셀레늄 .....	229
다. 종자 발아 및 식물 성장 조사 .....	229
라. 게르마늄 흡수량 분석 .....	229
2. 게르마늄이 채소종자발아 및 유묘 생장에 미치는 영향 .....	230
가. 채소종자 발아에 미치는 영향 .....	290
나. 유묘 생장에 미치는 영향 .....	232
다. 게르마늄 흡수특성 .....	235
라. 게르마늄 용액 pH에 따른 발아특성 및 생육특성 .....	236
3. 셀레늄이 채소종자발아 및 유묘 생장에 미치는 영향 .....	237
가. 채소종자 발아에 미치는 영향 .....	237
나. 유묘 생장에 미치는 영향 .....	238
다. 셀레늄 흡수특성 .....	240

4. 연구결과 요약 .....	241
II. 게르마늄 함유 기능성 상추 수경재배 기술 개발 .....	243
1. 공시 상추 .....	243
2. 상추 재배방법 .....	243
3. 게르마늄처리 .....	243
4. 처리 시험별 상추 생육특성 조사 .....	244
5. 상추 내 게르마늄 및 일반성분 분석 .....	244
6. 양액 내 게르마늄 안정화 정도 검토 .....	244
가. 양액 농도에 따른 게르마늄 용해도 변화 .....	244
나. pH에 따른 게르마늄 용해도 및 일반성분 변화 .....	244
다. 외부 온도 수준별 게르마늄 용해도 변화 .....	246
7. 양액재배방식별 상추 생육특성 및 게르마늄 흡수특성 비교 검토 .....	247
8. 상추생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도범위 구명 .....	249
가. 상추 생육특성 .....	249
나. 게르마늄 흡수 특성 .....	251
다. 게르마늄 엽면처리시 독성발생 범위 .....	252
9. 상추 생육촉진 게르마늄 적정 처리농도 구명 .....	255
가. 상추 생육특성 .....	255
나. 게르마늄 흡수 특성 .....	258
10. 상추의 게르마늄 흡수 및 식물체내 이동특성 .....	259
가. 양액 pH별 상추 생육특성 및 게르마늄 흡수 특성 .....	259
나. 상추 부위별 게르마늄 분포 특성 .....	261
11. 연구결과 요약 .....	262
III. 게르마늄함유 기능성 오이 수경재배 기술 개발 .....	265
1. 공시 재료 .....	265
가. 공시 오이 .....	265
나. 공시 게르마늄 .....	265
다. 공시 양액 .....	265
2. 게르마늄 및 일반성분 분석 .....	266
3. 오이 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위 구명 .....	266
가. 오이종자 발아에 대한 게르마늄 독성발생 농도 조사 .....	266
나. 오이 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 조사 .....	270
4. 비교형배지경 (소형담액경)을 이용한 게르마늄 최적처리 방법 구명 및 식물체 내 게르마늄 이동 특성 구명 .....	282
가. 오이재배 및 게르마늄 처리방법 .....	282

나. 게르마늄 최적 처리방법 구명 .....	284
(1) 게르마늄 처리방법별 지상부 및 지하부 생육 특성 .....	284
(2) 게르마늄 처리방법별 과실 (오이) 성장 특성 .....	288
다. 식물체내 게르마늄 분포 및 이동특성 구명 .....	290
(1) 처리방법별 식물체 내 게르마늄 함량 분포 .....	290
(2) 처리방법별 식물체 내 게르마늄 흡수량 .....	293
라. 과실 (오이) 부위별 게르마늄 분포 .....	297
마. 처리방법별 식물체 내 게르마늄 흡수율 구명 및 최적처리방법 구명 .....	298
5. 고품배지경 (필라이트경)을 이용한 게르마늄 최적처리방법 및 최적 처리농도 구명 ..	301
가. 오이재배 및 게르마늄 처리 방법 .....	301
나. 게르마늄 처리방법 및 처리농도별 생육 특성 .....	301
다. 게르마늄 처리방법 및 처리농도별 과실 (오이) 성장 특성 .....	304
라. 게르마늄 처리방법 및 처리농도별 과실 내 게르마늄 흡수 특성 .....	308
6. 고품배지경 (필라이트경)을 이용한 게르마늄 처리방법별 최적 게르마늄 처리횟수 구명 .....	310
가. 오이재배 및 게르마늄 처리방법 .....	310
나. 게르마늄 처리횟수별 생육 특성 .....	311
다. 게르마늄 처리횟수별 과실 (오이) 성장 특성 .....	314
7. 연구결과 요약 .....	317
IV. 게르마늄함유 기능성 잣 수경재배 기술 개발 .....	322
1. 공시 재료 .....	322
가. 공시 잣 종자 .....	322
나. 공시 게르마늄 .....	322
다. 공시 양액 .....	322
2. 게르마늄 및 일반성분 분석 .....	323
3. 잣 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위 구명 .....	323
가. 잣 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위 .....	323
(1) 성장반응특성 .....	323
(2) 게르마늄 흡수 특성 .....	328
4. 비고형배지경 (소형 담액경)을 이용한 게르마늄 최적처리 방법 구명 및 식물체 내 게르마늄 이동 특성 구명 .....	333
가. 잣 재배 및 게르마늄 처리 방법 .....	333
나. 게르마늄 최적 처리방법 및 흡수특성 구명 .....	333
(1) 성장반응특성 .....	333
(2) 엽록소 함량 .....	338



(3) 뿌리 세포 특성 .....	339
(4) 게르마늄 처리 방법에 따른 흡수 특성 및 이동특성 .....	341
(가) 처리방법별 식물체내 게르마늄 함량 .....	341
(나) 처리방법별 식물체내 게르마늄 흡수량 .....	342
(다) 처리방법별 식물체내 게르마늄 흡수율 구멍 및 최적처리방법 구멍 .....	344
5. 연구결과 요약 .....	347
제 4 절 게르마늄함유 기능성 채소의 안전성 및 약리효과 검증 .....	349
I. 유기 게르마늄을 함유한 상추의 단일 경구투여 독성 시험 .....	349
1. 시료 및 실험동물 .....	349
가. 실험 시료 및 실험군 .....	349
나. 실험동물 및 사육조건 .....	349
2. 관찰 및 검사항목 .....	349
가. 일반 및 임상증상 관찰 .....	349
나. 체중 변화 .....	349
다. 사료 및 물 섭취량 .....	349
라. 장기무게 측정 .....	350
마. 혈액학적 분석 .....	350
바. 혈액 생화학 분석 .....	350
사. 비장세포 증식반응 측정 .....	350
아. 세포 표면분자 분석 .....	351
자. 통계처리 .....	351
3. 시험결과 .....	351
가. 일반 및 임상증상 관찰 .....	351
나. 체중 변화 .....	351
다. 사료 섭취량 변화 .....	353
라. 물 섭취량 변화 .....	355
마. 장기 무게 변화 .....	357
바. 혈액 생화학 분석 .....	358
사. 혈액학적 분석 .....	358
아. 림프구 증식반응 .....	363
자. 림프구 비율 .....	363
4. 연구결과 요약 .....	369
II. 유기 게르마늄을 함유한 상추의 반복 경구투여 독성 시험 .....	371
1. 시료 및 실험동물 .....	371
가. 실험 시료 및 실험군 .....	371

나. 실험동물 및 사육조건 .....	371
2. 관찰 및 검사항목 .....	371
가. 일반 및 임상증상 관찰 .....	371
나. 체중 변화 .....	371
다. 사료 및 물 섭취량 .....	371
라. 장기무게 측정 .....	372
마. 혈액학적 분석 .....	372
바. 혈액 생화학 분석 .....	372
사. 비장세포 증식반응 측정 .....	372
아. 세포 표면분자 분석 .....	373
자. 복수암에 대한 종양억제 효과측정 .....	373
차. 통계처리 .....	373
3. 실험결과 .....	373
가. 일반 및 임상증상 관찰 .....	373
나. 체중 변화 .....	373
다. 사료 섭취량 변화 .....	374
라. 물 섭취량 변화 .....	374
마. 장기 무게 변화 .....	374
바. 혈액 생화학적 분석 .....	375
사. 혈액학적 분석 .....	375
아. 비장세포의 증식반응 .....	375
자. 림프구의 비율 .....	375
차. 복수암 억제 효과 .....	376
4. 연구결과 요약 .....	394
제 5 절 게르마늄함유 친환경 농자재 개발 .....	395
I. 게르마늄관련 문헌 자료 정리 및 게르마늄 농자재 수집 분석 .....	395
1. 게르마늄관련 자료 정리 .....	395
2. 게르마늄관련 농자재의 문제점 분석 .....	408
3. 시판중인 게르마늄 함유 농자재의 수집, 분류 및 함량 분석 .....	410
II. 용해교반기를 이용한 액상 게르마늄 시제품의 개발 .....	412
1. 게르마늄 (GeO <sub>2</sub> )의 용해 실험 .....	412
2. 게르마늄 제제 (액상)의 안정화 실험 .....	415
3. 제형별 시제품 개발 .....	415
4. 연구결과 요약 .....	418

<b>제 4 장</b>	<b>목표달성도 및 관련분야에의 기여도</b>	421
<b>제 5 장</b>	<b>연구개발 성과 및 성과 활용계획</b>	423
제 1 절	연구개발 성과	423
1.	논문게재 성과	423
2.	학술회의 논문발표	423
3.	특허 성과	425
4.	기술료 징수 현황	425
5.	사업화 현황	425
6.	인력활용/양성 성과	426
7.	경제사회 파급효과	426
제 2 절	연구개발 성과 활용계획	428
1.	기대효과	428
2.	활용방안	428
3.	추가연구의 필요성	429
4.	타연구에의 활용계획	429
5.	실용화, 산업화 계획	429
6.	교육, 지도, 홍보 등 기술확산 계획	429
7.	특허, 품종, 논문 등 지식재산권 확보계획	430
<b>제 6 장</b>	<b>연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보</b>	431
<b>제 7 장</b>	<b>참고문헌</b>	433



## 제 1 장 연구개발과제의 개요

지구상에 존재하는 원소는 지금까지 103개가 밝혀졌지만 이미 알려진 원소라 할지라도 그 원소의 화학적 특성, 존재형태 및 지각·수계·식물에 함유되어 있는 양, 인간에게 미치는 영향 등 자세한 연구가 이루어진 원소는 많지 않다. 게르마늄(Ge)은 1886년 Clemens Winkler에 의해 알려지게 되었는데, 지각에서  $7.0 \text{ mg kg}^{-1}$  정도 밖에 차지하고 있지 않은 원소로서 이에 대한 연구는 다른 원소들에 비해 많이 이루어지지 않았다.

게르마늄(Germanium)은 무기게르마늄과 유기게르마늄으로 분류할 수 있는데, 무기게르마늄( $\text{GeO}_2$ )은 인체내 유입시 빈혈, 신기능장애, 근육 장애를 유발하는 것으로 알려져 있으나(Obara et al., 1991), 유기게르마늄은 항종양 효과(Jang et al., 1991), 항돌연변이 효과(Mochizuki and Kada, 1982), natural killer 세포 및 macrophages의 활성화를 포함하는 면역강화 작용(Suzuki et al., 1986)과 virus 감염의 치료(Aso et al., 1985) 관절염 치료 효과와 같은 항염증 작용(Dimartino, 1986), 해열·진통 작용(Suzuki and Taguchi, 1983), 중금속 해독 작용(Lee and Chung, 1991) 및 운동성 증가(Ho et al., 1990) 등의 다양한 약리작용을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 최근 게르마늄은 한방약재, 키토산, 인삼, 칼슘, 녹차, 목초액, 참숯, 맥반석 등의 농자재와 함께 유기게르마늄이 약리효과를 가진다는 보고로 기능성 농산물 생산을 위한 농자재에 사용되고 있는 실정이다.

특히, 게르마늄 농자재의 경우 토양 중 게르마늄 함량이 낮기 때문에 작물체중 게르마늄 함량이 낮아 무기게르마늄을 농자재로 사용하여 유기게르마늄화 하기위한 효과적인 농축의 수단으로 다양한 연구들이 그 동안 수행되었으며, 무기게르마늄을 유기게르마늄화하기 위한 수단으로는 미생물, 효모(Kehlbeck, 1983 ; Nobohiro et al., 1980 ; Wei, 1992)류 및 균조류를 이용하기도 하였으며, 몇몇 연구자는 유기게르마늄함유 식물체를 개발하기 위하여 일당귀와 인삼(Lee et al., 1994), 강활(Park et al., 1996)을 이용하기도 하였다.

게르마늄 농자재가 사용되어지고 있는 작물로는 벼, 참외, 단감, 고추, 딸기, 토마토, 부추 등 30여개 품목에 재배면적도 667ha에 이르며, 일반농산물 보다는 20-30% 높은 가격에 거래되고 있는 실정이다(농민신문, 2002). 하지만 현재 생산되고 있는 기능성농산물은 기능성 성분이 얼마나 함유되어 있는지 불확실하며, 또한 기능성이 과학적으로 검정되지 않은 상태에서 유통되고 있는 것이 대부분이고 단순히 한방영양제, 키토산, 게르마늄 등 특이한 농자재를 작물에 처리하여 생산한 농산물이면 기능성이 있는 것처럼 브랜드화 하여 소비자들에게 많은 혼란을 야기하고 있는 실정이다.

또한 다양한 종류의 게르마늄 관련 농자재가 농업에 사용되고 있으나 농자재와 게르마늄함유 농산물에 대한 게르마늄 함량이 얼마인지 불분명한 상태에서 농산물이 유통되고 있으며, 기능성을 목적으로 게르마늄을 사용하고 있지만 게르마늄함유 농산물의 기능성 검정에 대한 연구가 거의 없는 실정이다.

따라서 게르마늄함유 농자재와 농산물 중 게르마늄 함량을 분석하여 문제점을 파악하고 농작물의 게르마늄 흡수 효율을 높이기 위해 흡수 전이가 쉬운 게르마늄 농자재 개발이 필요하

며, 작물에 있어 게르마늄 적정 처리농도 설정과 게르마늄 흡수특성 구명, 생산된 게르마늄함유 농산물이 유기게르마늄화 되었는지에 대한 증명, 기능성 검정에 의한 게르마늄 농산물의 안전성 연구를 통한 게르마늄함유 기능성 농산물 생산기술 개발이 절실히 필요할 것이다. 향후 이들 연구결과는 국내 농산물의 경쟁력 확보와 농산물의 브랜드화에 의한 농가소득 증대뿐만 아니라, 우리나라 기능성 농산물의 해외 수출이 가능할 것으로 판단된다.

이에 본 연구는 식물체내 흡수전이가 우수한 게르마늄함유 친환경 농자재를 개발하고, 이를 바탕으로 게르마늄함유 기능성 쌀 생산 기술을 개발하고, 게르마늄함유 기능성 채소 수경재배 기술을 개발하며, 게르마늄함유 기능성 채소의 안전성 및 약리효과를 검증하고자 하였다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

게르마늄은 1886년 Clemens Winkler가 argyrodite라는 광석에서 최초로 발견한 원소로서 Germania에서 그 어원을 가져 왔다. 게르마늄은 원소주기율표에 C, Si, Sn, Pb와 함께 4A족에 속하는 연성과 전성이 없는 비금속 물질로서 반도체, 컴퓨터 및 전기공학 분야에 널리 사용되어 왔다. 게르마늄은 원자번호 32번, 원자량 72.59, 비중 5.323, 최외각 전자는  $4s^2 4p^2$ 를 가지며 녹는점 (melting point)과 끓는점 (boiling point)은 각각 937.4, 2,830°C의 화학적 특성을 가지고 있다. 자연상태에서 게르마늄 동위원소의 질량수는 70, 72, 73, 74 및 76 이며 각각 21%, 27%, 8%, 37% 및 8% 정도 존재하고 있다.

게르마늄은 지각 중 평균  $7.0 \text{ mg kg}^{-1}$  차지하고 있으며, 보통  $1.0-1.7 \text{ mg kg}^{-1}$  범위 정도를 함유하고 있다 (Merian 등, 199; Bernstein 등, 1985). 지표의 풍화과정에서 게르마늄은 어느 정도의 이동성을 가지지만,  $\text{Ge}(\text{OH})_4$ , 점토광물, Fe oxide, 유기물질, coal에 흡착하여 재결정을 이루며 존재하고 있다. 지표에서 게르마늄은  $4^+$ ,  $2^+$ 로 존재하지만  $\text{HGeO}_2^-$ ,  $\text{HGeO}_3^-$ ,  $\text{GeO}_3^{2-}$ ,  $\text{GeS}^{2-}$ 와 같은 형태로도 존재한다 (Pendias 등, 1984). 게르마늄은 이온 자체로 존재하기 보다는 대부분 sulfosalt 형태로 존재한다 (Merian 등, 1991). 가장 대표적인 게르마늄 광산은 남아프리카공화국의 Tsumeb 광산과 콩고의 Prince-Leopold 광산으로서 이들 지역에서 게르마늄에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다 (Bernstein 등, 1985). 지각을 이루는 여러 암석중에 함유되어 있는 게르마늄의 함량은 Table 1에서 보는 바와 같다 (Bernstein 등, 1985).

Table 2-1. Abundance of germanium in various terrestrial materials.

Terrestrial material		Mean Ge ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Range Ge ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
Bulk earth		13.8	
Crust		1.4	1.0 - 1.7
Igneous rock	Granitic & Intermediate	1.5	0.5 - 4.0
	Mafic	1.4	0.7 - 3.1
	Ultramafic	0.91	0.55- 1.6
Sedimentary	Siliceous	1.4	0.2 - 3.3
	Carbonate	0.09	0.03- 0.17
Metamorphic rock	Siliceous	1.7	0.8 - 8.0
	Siliceous ooze	1.7	1.1 - 2.2
Deep sea sediment	Carbonate ooze	0.3	0.0 - 1.4
	Clays	2.1	1.4 - 2.8
	Manganese nodules	2.5	1.8 - 3.2

게르마늄은 최근까지 마그마 분화활동이 일어난 지역이나 휘발성 물질들이 농축된 지역에서도 높은 농도를 나타내며 (Bernstein 등, 1985), pegmatite, 황옥, 운모로 이루어진 greisen에 게르마늄이 상당량 존재한다. 퇴적암의 탄산염 성분으로 이루어진 암석은 상대적으로 게르마늄 함량이 적고 (Pendias 등, 1984, Bernstein 등, 1985) shale의 경우 유기물을 함유하고 있을 때

게르마늄 함량이 많은 것으로 알려지고 있다(Burton 등, 1959).

게르마늄은 주로 규산염 광물에서 게르마늄과 실리콘 사이의 치환에 의해 다량으로 분포하고 있지만 산화광물, 수산화광물, 철-니켈 우석이나 광물, 황화광물, 황산염광물, 할로겐광물, 탄산염광물, 석탄, 페그마타이트 등과 같은 비규산염 광물에도 존재한다. 게르마늄은 규산염광물, 황화광물에서 Zn, Cu, As, Fe와 치환이 일어나는데 (Bernstein 등, 1985; Vlasov 등, 1966), 그 중 게르마늄과 실리콘의 치환은 게르마늄의 가장 큰 특징이라 할 수 있다. 실리콘과 게르마늄은 같은 4족 원소이면서 비슷한 이온 반지름 (Ge : 0.39 Å, Si : 0.26 Å)과 공유결합 반경 (Ge : 1.22 Å, Si : 1.17 Å)을 가지며 비슷한 화학적 특성으로 인해 서로 간에 치환이 일어난다. 지각을 구성하는 성분 중에 Ge/Si 비는 어느 지역이나 거의 일정하게  $1.3 \times 10^{-6}$ 인 것으로 알려지고 있다. 게르마늄은 실리콘과 같이 4면체, 8면체의 결정형태를 띠고 있는데 주로 4면체를 이루고 있으며, 4면체 규산염광물 중에서도 상대적으로 약한 힘으로 연결되어진 광물인 휘석과 감람석이 석영, 장석 보다 실리콘과 게르마늄 간의 치환이 잘 이루어지고, Ge/Si ratio도 높다 (Bernstein 등, 1985). Table 2-2는 게르마늄을 주 원소로 함유하는 광물을 나타내었다 (Bernstein 등, 1985).

Table 2-2. Minerals containing essential germanium

	Mineral	Formula
	Argyrodite	Ag <sub>8</sub> GeS <sub>6</sub>
	Briartite	Cu <sub>2</sub> (Fe,Zn)GeS <sub>4</sub>
Sulfide	Germanite	Cu <sub>11</sub> Ge(Cu, Zn, Fe, Ge, W, Mo, As, V) <sub>4-6</sub> S <sub>16</sub>
	Renierite	Cu <sub>10</sub> (Zn <sub>1-x</sub> Cu <sub>x</sub> )Ge <sub>2-x</sub> As <sub>x</sub> Fe <sub>4</sub> S <sub>16</sub>
	Unnamed	GeS <sub>2</sub>
	Argutite	GeO <sub>2</sub>
Germanate /Oxide	Bartelkeite	PbFe <sub>2</sub> +Ge <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
	Brunogeierite	Fe <sub>2</sub> GeO <sub>4</sub>
	Carboirite	FeAl <sub>2</sub> GeO <sub>5</sub> (OH) <sub>2</sub>
	Ge-lepidomelane	(K,Na,H <sub>3</sub> O) <sub>2</sub> Fe <sub>6</sub> (Ge <sub>5</sub> Al <sub>3</sub> )O <sub>20</sub> (Cl <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> )
	Otjisumeite	PbGe <sub>4</sub> O <sub>9</sub>
Hydroxide	Mangan-stottite	Mn <sup>2+</sup> Ge(OH) <sub>6</sub>
	Stottite	Fe <sup>2+</sup> Ge(OH) <sub>6</sub>
Sulfate	Itoite	PbGe(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>
	Fleischerite	Pb <sub>3</sub> Ge(OH) <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O
	Schaurteite	Ca <sub>3</sub> Ge(OH) <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O

미국 일대의 표토에 함유되어 있는 게르마늄의 함량은 평균 1.1 mg kg<sup>-1</sup> 정도로 거의 일정



한 것으로 알려져 있으며 이는 지각의 평균 게르마늄 함량과 비교했을 때 거의 유사한 값으로 전 세계적으로도 이와 유사한 값을 가질 가능성이 높다고 하였다 (Pendias 등, 1984). 그러나 우리나라 토양 중 게르마늄 함량분석 연구로 충남 금산군의 반암과 화강암지역 암석과 인삼밭 토양, 산 토양에 함유된 게르마늄 함량을 분석한 보고가 있는데, 반암지역은 0.10, 0.54 및 0.58 mg kg<sup>-1</sup>이었고 화강암의 경우는 0.30, 0.59 및 0.76 mg kg<sup>-1</sup> 이라고 보고하였으며 (전호식, 2000), 이 자료 외에는 토양 중 게르마늄 함량 분석에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

최근 보양, 강장작용이 있는 약초인 인삼, 영지, 마늘, 알로에 및 컴프리를 비롯한 여러 생약들이 비교적 많은 양의 유기게르마늄을 함유하고 있는 것으로 알려져 있다. 이들 약용식물들은 토양에 함유된 게르마늄을 흡수하여 식물체내에 유기게르마늄 형태로 비교적 많은 양을 함유하고 있다는 것이 밝혀져 있다 (Kim 등, 1998; 淺井一彦, 1975; Goto, H. 1989).

Conner와 Shacklette는 식물체에 평균 20 mg kg<sup>-1</sup> 정도의 높은 게르마늄이 함유되어 있다고 하였다. 식물에 들어있는 게르마늄의 함량은 0.1-1.0 mg kg<sup>-1</sup> 이나 약용으로 쓰이는 작물에는 게르마늄 함량이 높은 편이다 (Merian 등, 1991). 석탄이 다른 광물보다 게르마늄의 함량이 높은 이유도 석탄의 주성분인 식물유체에 의한 것으로 알려져 있다 (Manskaya 등, 1968).

벼는 게르마늄을 쉽게 축적하는 농작물로 최고 약 1% 정도까지 높은 게르마늄이 함유된 것도 있다고 보고하였다 (Pendias 등, 1984). Yang (2001)은 식물체중의 게르마늄을 정량한 결과는 White mushroom이 0.088 mg kg<sup>-1</sup>, Ganoderma 0.145 mg kg<sup>-1</sup>, Tremella 0.071 mg kg<sup>-1</sup>, Ginseng 0.082 mg kg<sup>-1</sup>, Chrysanthemum 0.075 mg kg<sup>-1</sup> 및 Ginkgo 0.084 mg kg<sup>-1</sup> 이라고 하였다.

우리나라 농작물 중 게르마늄 함량에 대한 연구로 충남 금산군 반암 지역의 경우 인삼 0.022 mg kg<sup>-1</sup>, 벼 0.539 mg kg<sup>-1</sup>, 콩잎 0.029 mg kg<sup>-1</sup> 및 깻잎 0.049 mg kg<sup>-1</sup>으로 나타났고, 화강암 지역의 경우 인삼 0.003 mg kg<sup>-1</sup>, 벼 0.001 mg kg<sup>-1</sup> 및 고추 0.019 mg kg<sup>-1</sup> 함유하고 있다고 하였다 (전호식, 2000). Jeong (1998)은 국내산 약용식물인 신선초와 인삼에 대해 게르마늄 함량을 분석하였으며 신선초의 경우 수집지역에 따라 29.7-385.7 mg kg<sup>-1</sup> 으로 함량에 차이가 심하다고 하였다. 이는 재배되는 지역적 특성과 생육환경, 시료의 채취시기 등에 의한 영향일 것으로 추정하였으며, 5년 된 인삼의 경우는 83.2 mg kg<sup>-1</sup> 으로 신선초 보다는 함량이 낮았다. 이외에 우리나라 토양과 농작물의 게르마늄 함량 분석에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

수계에 존재하는 게르마늄은 pH의 영향을 받게 되는데, pH가 낮을수록 게르마늄의 농도는 높다. 하지만 게르마늄도 다른 원소와 마찬가지로 pH외에 주변 환경, 즉 강이나 시내 주변을 이루고 있는 광물이나, 식물 등에 영향을 받게 되어 수계의 게르마늄의 농도가 영향을 받게 된다 (Froelich 등, 1981).

Table 2-3. Concentrations of germanium in mineral water and ground water in Korea

Sampling area	Concentration ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ )
Yangju-gun (Kyonggi-do)	0.75
Mt. Ssong ni (Chungcheongbuk-do)	3.16
Pochun gun (Kyonggi-do)	0.46
Chongwon-gun (Chungcheongbuk-do)	0.46
Mt. Ji ri (Hadong-gun, Gyeonsangnam-do)	1.39
Hongcheon-gun (Kangwon-do)	2.83
Chongwon-gun (Chungcheongbuk-do)	1.73
Mt. O dae	0.84
Inje-gun (Kangwon-do)	1.84
Namyangju-city (Kyonggi-do)	1.24
Gapyeong-gun (Kyonggi-do)	1.21

\* : Not published data of KBSI.

게르마늄은 하천보다는 바닷물에서 농도가 높다. 이는 해양지각에서 계속적으로 일어나고 있는 열수작용 (hydrothermal process)에 의한 것으로 제시되었다 (Froelich 등, 1981; Lewis 등, 1985). Table 2-3은 우리나라 샘물과 지하수에 용존되어 있는 게르마늄 농도에 대한 자료이다.

토양, 농작물 및 수계에서의 게르마늄 함량이 매우 낮아 게르마늄을 정확히 분석하기 위한 다양한 방법들이 사용되었다. 게르마늄 분석법으로는 spectrophotometer를 이용한 발색법 (Choi 등, 1992), 원자흡광분광법 (Han 등, 1997), Gas chromatography (Choi 등, 1992)이 있으나 검출한계 및 재현성에 있어서 단점이 있다. 최근에는 Gas chromatography (Park, 등, 1995), 수소화물유도결합 플라즈마분광법 (Kim 등, 1988), Osteryoung Wave Voltammetry법 (Joe, S. K. 2001), Differential Pulse Polarography (Shin 등, 1996), Adsorption Stripping Voltammetry법 (Jeong 등, 1998) 등이 이용되어 분석감도가 크게 향상되어 극미량까지 측정할 수 있는 단계에 이르렀다. 그러나 게르마늄은 전처리시 회화과정의 낮은 온도에서도 휘발성인 GeO나 GeS로 되어 손실을 일으키므로 matrix modifier를 사용해서 분석해야만 한다고 하였다 (Nagata, 1985). 또 Gleim (1982)의 보고에 의하면 분해시 분해액의 염소기와 결합하면  $\text{GeCl}_4$ 가 되어 비등점 ( $84.0^\circ\text{C}$ )이 낮아지므로 높은 온도로 분해할 경우 휘발하기 쉽기 때문에 분해온도의 영향을 받는다고 주장하여 게르마늄 분석시 첨단기기를 사용하는 것도 필수이지만 전처리 과정이 매우 중요함을 알 수 있다. 실제 인삼을 가지고 여러 연구자들이 게르마늄 함량을 분석하였는데 Table 2-4에서 보는 바와 같이 분석자들이 어떤 기기를 사용했느냐에 따라 게르마늄 함량에 차이가 심하였다.

Table 2-4. Concentration of germanium in ginseng radix by several researchers  
(김선태 등, 1988)

Analyst	Concentration (mg kg <sup>-1</sup> )	Analytical method
Asai	250-320	-
Fujimura	60	UV-VIS
Ninomiya	0.64	UV-VIS
Park et al.	97-307	Flameless AA
Mino et al.	<0.001-0.006	Flameless AA
Sitamura et al.	0.007	AA
Kim et al.		ICP
Fresh ginseng	<0.0012-0.01	
White Ginseng	0.002-0.009	

Park (1995)은 원자흡광분광광도계 기기를 사용하여 분석하였는데 인삼의 게르마늄 함량이 97-307 mg kg<sup>-1</sup>이었으며, Fujimura (藤村 みつ子, 1979)는 UV-Vis spectrophotometer를 사용하였는데 60 mg kg<sup>-1</sup>이었고, Kim (1998)등은 ICP를 이용하여 분석하였더니 0.007 mg kg<sup>-1</sup> 함유하고 있다고 하였다. 최근에는 게르마늄 분석에 있어서 최첨단 기기를 사용함으로써 분석 기기에 대한 오차는 줄어들었지만 전처리 과정에서 오차가 많이 나므로 게르마늄의 효율적인 분석을 위한 전처리방법 연구가 필요한 실정이다.

게르마늄의 의학적인 효능이 처음 알려진 것은 1930년 프랑스와 스페인의 국경지방인 Lourdes의 샘물이 여러 가지 질병치료에 효과가 있다고 하여 샘물의 성분 분석결과 게르마늄 함량이 매우 높다는 사실이 알려지면서 부터이다.

게르마늄은 무기게르마늄과 유기게르마늄으로 분류할수 있다. 게르마늄의 독성연구로는 합성한 무기게르마늄 (GeO<sub>2</sub>)을 장기 복용한 환자에서 빈혈, 신기능장해, 신경병증, 근장애를 유발하는 것으로 알려져 있으며 (Obara 등, 1991; Iijima 등, 1990), 랫드에서도 신기능 장애와 근장애를 일으키는 것으로 보고되었다 (Higuchi 등, 1991; Sanai, 1990). Sanai (1990; 1991; 1991)의 연구보고에 의하면 6주된 수컷 rat를 사용하여 GeO<sub>2</sub> 150 mg kg<sup>-1</sup>을 매일 13주 동안 경구 투여한 처리구의 rat는 체중이 감소하고 신장, 심장 및 간에 게르마늄이 축적되었으며, 특히 신장에 116.6 mg kg<sup>-1</sup>으로 가장 많이 축적되었으며, 간과 심장에는 각각 44.2, 17.8 mg kg<sup>-1</sup>이 축적되었다. Schauss (1991)도 게르마늄을 먹인 쥐의 신장에는 게르마늄 함량이 높았다고 하였으며, Nagata 등 (1985)도 GeO<sub>2</sub>를 장기 복용한 여자 성인의 경우 신장 및 다른 기관에서 게르마늄이 발견되었으며, GeO<sub>2</sub>가 신장독성을 유발할 수 있다고 보고하였다.

반면, 1967년 Asai Germanium Research Institute에서 무기물인 이산화게르마늄으로부터 합성한 유기게르마늄인 Ge-132 (carboxyethylgermanium sesquioxide)를 독성 실험한 결과 JCL-Wistar 랫드에 0.556-5 g kg<sup>-1</sup>의 용량을 3개월 동안 경구투여시 특이할 만한 독성증상을 나타내지 않았다. 단 5 g kg<sup>-1</sup> 투여군에서 설사, 연변, 체중감소, 시료섭취량 감소, 음수량 증

가, 요량 증가와 같은 증상을 보였으며, 최대 무해용량은  $1.667 \text{ g kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 인 것으로 보고되었다 (Sugiya, Y. 등, 1986; Evans 등, 1970). Beagle Dog에 대한 만성독성시험에서도  $125\text{--}500 \text{ mg kg}^{-1}$ 의 용량 투여시 독성증상은 없었다고 하였으며 (Nagata, T. 등, 1978), JCL-Wistar 랫드에 대한 생식독성·최기형성 시험에서도  $0.25\text{--}1 \text{ g kg}^{-1}$ 의 용량을 투여시 특이할만한 독성을 나타내지 않았으며, 최대무해용량이  $1 \text{ g kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$  이상인 것으로 보고되었다 (Sugiya, Y. 등, 1986; Nagai, H. 등, 1980).

인터페론 생성 및 항종양효과에 대한 연구로 Suzuki (1986, 1989, 1985, 1985)는 유기게르마늄이 interferon induction, antitumor activity, NK cell activity 증가, cytotoxic macrophage의 생성 등 다양한 생물학적 약리효과를 가지고 있다고 하였으며, Ohotta (Ohotta, 1984)는 게르마늄이 반도체 성질을 가져 electronic level에서 유전적 발현을 조절함으로써 암세포막의 잠재적 활성을 감소시키고 암세포가 증대되는 것을 방해한다고 하였다. 게르마늄이 항암효과가 있었던 이유는 1, 2-Dimethylhydrazine이 발암물질로 작용하기 위해서는 azomethane, azoxymethane을 거치는데 이때 oxidation이 필요한데 게르마늄은 이 단계를 저지함으로써 발암활성을 저하시켰다고 하였다 (Jao 등, 1990).

Propagermanium은  $[(\text{O}_{1/2})_3\text{GeCH}_2\text{CH}_2\text{CO}_2\text{H}]_n$ 의 화학적 구조를 가진 유기게르마늄화합물로 일본에서는 B형 간염환자의 치료제로 사용되어져 왔다. 또 propagermanium은 바이러스에 감염된 쥐에서  $\alpha$ ,  $\beta$  및  $\gamma$ -interferon의 생성을 증가시켰다고 하였다 (Ishiwata 등, 1990). 2, 5-oligoadenylate synthetase는 인터페론의 양을 측정하기 위한 enzyme maker로 사용되기도 하는데 특히 적은량의 인터페론을 정량하는데 사용되어진다 (Ishiwata 등, 1990).

Spirogermanium은 spirane 구조의 1-carbon 일부분이 금속 게르마늄으로 치환된 azaspirane 화합물의 하나로 생물학적 활성을 향상시킨 항암약이며 (Rice 등, 1974; Slavik 등, 1982), macrophage의 활성증대, 항관절염 및 면역조절제로서 역할을 한다고 하였으며, macrophage의 활성증대로 superoxide ( $\text{O}_2^-$ )의 생성도 감소시켰다. Spirogermanium의 작용기작이 아직 확실히 밝혀지지 않는 않지만 DNA, RNA, protein 생합성 저해로 이해하는 것이 가장 지배적이다 (Hill 등, 1982).

면역력 강화 및 항virus 효과와 관련한 연구로 natural killer (NK) cell은 대과립 임파구 (large granular lymphocyte : LGL)의 일종으로 MHC (major histocompatibility complex)와 무관한 비 특이적으로 각종 종양세포와 virus 감염세포에 대하여 세포 살해성으로 작용하는 것으로 보고되고 있으며 (Ahn 등, 1989; Talmadge 등, 1980), 또한 interferon등에 의해 NK cell 자신도 활성이 증가된다고 보고되었다 (Hanna 등, 1980). Ge-132는 gamma interferon을 유발하여 수술후 면역학적 조절기능을 한다고 하였다 (Nakada 등, 1993). Ge-132, 유기게르마늄 화합물은 쥐 실험에서 암세포 생육억제 및 평균 생존시간의 증가 등으로 항암효과가 있는 것으로 알려졌다 (Kumano 등 1985; Kumano 등, 1978; Suzuki 등, 1983; Aso 등, 1989).

골다공증 치료효과에 관한 연구로 Ge-132는 골아세포의 활성을 증대하는 약리효과 (Nakamura 등, 1987; Orimo 등, 1985; Watanabe 등, 1986)와 고령자 골다공증에 있어서 미네

랄 분해 억제 및 생물학적 반응조절제와 같은 효과를 가지고 있다. Fujii (1993)의 보고에 의하면 암컷 쥐의 난소를 적출한 다음 Ge-132를 투여하였더니 투여하지 않은 처리구와 비교하여 대퇴골의 횡압강도가 증가하였고, 뼈의 질량이 증가되었다고 보고하였다.

게르마늄은 중금속 해독작용에도 관여하는 것으로 알려져 있다. 카드뮴이 체내에 유입되면 적혈구와 결합하여 혈중내로 이행되어지는데 혈장 내에선 고분자 단백질 특히 알부민과 결합되고, 일부는 thionein과 결합하여 metallothionein을 형성하므로 각 장기에 이행되어진다 (Kowel 등, 1979). 체내에 유입된 카드뮴의 체내 총량중 약 50%는 주로 간장과 신장에 축적되어도 뚜렷한 독성효과가 나타나지 않는 것은 metallothionein (MT) 형성에 기인한다고 알려져 있다. 일반적으로 생체 내에 유행성 중금속이 유입되었을 경우 자체해독기전으로 배설이 용이한 MT을 형성하는 것으로 보고되고 있다. MT는 생체중에 간장, 신장, 비장 및 실질조직 등에 주로 존재하며, cysteine을 다량 함유하고 있는 저 분자량의 수용성 단백질로서 -SH (sulfhydry)기가 Cd, Zn, Hg 및 Cu등과 같은 중금속들을 포함하여 간장 및 신장 등의 기능을 보호하는 것으로 보고되었다 (Evans 등, 1970). Lee와 Chung은 유기게르마늄 투여로 카드뮴의 간장독성에 대해 metallothionein 형성을 촉진시키므로 카드뮴의 독성을 감소 시켰다고 하였다.

유기게르마늄의 해독작용으로 Ge-132는 rat의 간 cytosolic glutathion S-transferase (GST)의 활성화에도 영향을 주어 Ge-132를 투여하였을 때 GST의 활성화는 증가시켜 조직내 glutathione의 함량 변동은 ethacrynic acid 투여로 억제되던 것이 Ge-132의 전처리로 ethacrynic acid 단독 투여군 보다 증가되었다.

유기게르마늄의 산소공급 증대효과도 알려져 있는데 게르마늄은 쉽게 H<sup>+</sup>와 결합해서 배출하고 O<sub>2</sub>의 이용을 최소화함으로써 신체기관에 산소를 많이 가지게 되고 건강을 유지하게 되는 것이다 (Ohotta T. 1984; Gondman S. 1988). Warburg (1996)는 정상적인 세포에 비해 암세포에는 산소가 결핍되어 있다는 것을 주장하여 노벨상을 수상하기도 하였다.

돌연변이 억제 효과로도 작용하는데 유기게르마늄은 free radical scavenger의 역할도 한다. 게르마늄은 O<sup>-</sup>와 쉽게 반응하여 항산화효과를 가진다. 불안정한 성질을 가진 free radical인 O<sup>-</sup>은 DNA 돌연변이를 일으킬 뿐만 아니라 질병을 일으키고, 노화를 일으키는 주된 요인이다 (Gondman, 1988).

그러나 모든 유기게르마늄이 약리효과를 나타내는 것은 아니다. Germanium-lactate-citrate를 복용한 환자에서 신부전증과 간종 (肝腫)과 같은 독성이 유발되었으며, sanumgerman은 마우스에서 카테콜아민과 세르토닌 신경계의 활성을 억제한다고 보고되었다 (Van der Spoel 등, 1991; Raisin 등, 1992).

최근에 게르마늄과 함께 기능성 원소로 셀레늄 (Se)이 있다. 1973년에 Rotruck (1973) 등이 셀레늄이 glutathione peroxidase (GSHPx)라는 항산화 효소 필수 구성성분으로 작용한다는 것을 발견함으로써 셀레늄의 항산화 작용 기전에 관한 문제가 해결되었다. 그 후 Forstrom (Forstrom 등, 1978)은 셀레늄이 이 효소의 activity sited selenocysteine으로 존재한다는 것을 밝혔다. 셀레늄은 방법은 다르지만 세포막에 존재하는 비타민 E처럼 지방의 과산화

(peroxidation)를 막아서 세포내부나 세포막의 기능이 손상되는 것을 막기 때문에 영양면에서 비타민 E의 손실을 줄이는 효과를 갖게된다.

한편, 역학조사에 의하면 셀레늄이 토양에 적게 함유된 지역에서 유방암과 대장암 등의 발발률이 높게 나타나서 셀레늄 부족과 암과의 연관성에 대해서도 연구가 진행되고 있다 (Cowgill, 1983). 동물 실험의 경우 동물의 식이에 고농도의 셀레늄 ( $1-8 \text{ mg kg}^{-1}$ )을 첨가할 경우, 여러 가지 발암 물질이나 바이러스로 유도된 암의 발발률을 낮춘다는 보고가 있다 (Liu 등, 1991). 유기 셀레늄 화합물인 selenomethionine과 selenocysteine 그리고 대부분의 식물성 식품에 존재하는 셀레늄은 다른 동물성 식품들보다 체내에서의 이용도 (bioavailability)가 좋은 편이다. Kumpulainen (Kumpulainen 등, 1985) 등은 유기화합물인 selenium yeast를 식사에 보충하는 것이 무기화합물인 sodium selenite를 보충하는 것보다 모유의 셀레늄 농도를 증가 시키는데 더 도움이 된다고 하였다. 미국과 스웨덴은 셀레늄을 영양 권장량 항목에 포함시키고 있다 (Food and Nutrition Board National Research Council Recommended Dietary Allowances 10th ed Washington, DC National Academy Press, 1989; Funk 등, 1990).

이에 반해 게르마늄은 독성, 안전성 및 약리효과 등에 관한 연구는 많이 되어 있지만 셀레늄 만큼 다양한 기능성 식품이 나오지 않고 있으며, 영양 권장량으로 설정되어 있지 않은 실정이다.

지각에 게르마늄은 낮은 농도로 존재하기 때문에 연구자들은 효과적인 농축의 수단으로 무기게르마늄을 이용하여 유기게르마늄화 하기위한 다양한 연구들이 수행되었는데, 유기화하기 위한 수단으로는 미생물, 효모 (Kehlbeck, 1983; Nobohiro 등, 1980; Wei, 1992), 녹조류 및 규조류를 이용하기도 하였으며, 몇몇 연구자는 유기게르마늄함유 식물체를 개발하기 위하여 벼 (Lee 등, 1997), 명일엽, 일당귀와 인삼 (Lee 등, 1994; 1995), 강활 (Park 등, 1996)을 이용하기도 하였다.

미생물을 이용한 유기게르마늄 생산은 Cho (1998)와 Klacinska (1986) 등에 의해 시도 되어 졌다. Klacinska (1986)등은 *Pseudomonas putida*를 배양하여 cell에 흡착된 게르마늄의 분포를 분석한 결과 주로 상등용액인 핵산이나 단백질 부분인 soluble fraction에 83.4% 분포하였고, 17%는 세포막을 구성하는 성분인 polyphosphate, polysaccharide, lipid의 insoluble fraction에 분포하고 있었다고 하였다. 미생물 cell내의 유기게르마늄의 축적은 Klacinska (1986)등이 *Pseudomonas putida* cell내에서 게르마늄의 축적은 주로 soluble fraction에서 이루어지고, 이중 대다수가 nucleic acid와 protein에 결합되어 있다는 것을 전자현미경 분석을 통해 확인하였다. 세포내의 축적기구는 germanium catechol complex로 되어 유도적인 catechol transport system을 이용한다고 (Klacincka 등, 1986; Chemielowski 등, 1986) 보고되고 있다. Cho (Cho, 1998)는 *Candida*, *Rhodotorula*의 낮은 Ge 축적에 비해 *Bacillus*속 균주가 고농도의 Ge 축적을 보인다는 보고에 따라 (Van Dyke 등, 1989; Slawson 등, 1992) *Bacillus*의 대량 분리원으로 전통적인 콩 발효식품을 수집, 건강식품소재로서 약리활성 및 유용성을 가진 Ge함유 균체로 만들기 위해 한국의 청국장, 일본의 Natto 및 인도네시아 자카르타 Tempe를 미생물 분리

원으로 사용했다. 생육대수기에 6% Glucose의 첨가는 2배정도 축적량을 증가시켰으며 0.2% catechol을 함께 첨가했을 때 균체내 Ge 축적량은 3.6배나 증가시킬 수 있었으며, 유기성 Ge인지 여부를 투석막을 통해서 24시간 dialysis 시켰을 때 투석막 안에 75-80% 이상이 (분자량 10,000 dalton) 고분자의 유기성단백질들과 함께 남아있으므로 유기성 germanium인 것으로 판단했다.

Nobuhiro (1980)등은 게르마늄을 함유하는 효모의 생산가능성을 제시하였고, Slawson (1992) 등과 Lee (1990)등은 게르마늄이 미생물에 대해 독성을 보이지만 미생물의 균체 내에 energy independent passive binding 또는 energy dependent mechanism 모두에 의해서 축적될 수 있음을 발표하였다. 미생물 균체를 이용하는 연구는 SCP (single cell protein)용 효모를 중심으로 이루어졌고, 이 효모를 이용한 유기게르마늄 생산 가능성은 Van Dyke(1989) 등이 배양액의  $\text{GeO}_2$  농도가  $1.0 \text{ mg mL}^{-1}$ 에 이르렀을 때 *Sacchromyces cerevisiae*의 생장이 온전히 저해됨과 미생물이 고농도  $\text{GeO}_2$ 에 적용할 수 있음을 보고하면서 시작되었다. Wei (1992)는 효모가 고농도의 무기게르마늄을 흡수할 수 있으며 효모균체 내에 축적된 게르마늄의 95% 이상인 유기게르마늄으로 전환하는 능력이 있음을 보고하였다. 또한 게르마늄을 함유한 효모가 Kehlbeck (1983) 등의 실험결과에서와 같이 항종양효과가 있을 뿐만 아니라, 동물의 건강에 유효하다는 것이 밝혀지면서 효모를 이용한 유기게르마늄의 생산은 점차 건강식품소재로 중요한 의미를 갖게 되었다. Kim (1995)등은  $\text{GeO}_2$  농도가  $80 \text{ mg L}^{-1}$ 인 배지 (pH = 8.0)에 내성효모를 접종하여  $30^\circ\text{C}$ 에서 24시간동안 배양한 배양액을 세척, 분쇄 및 원심분리하여 얻은 효모 세포벽과 핵 및 미토콘드리아 등의 소기관 그리고 세포액 중에 포함되어 있는 게르마늄의 함량을 측정 한 결과, 대부분의 게르마늄이 효모세포벽에 결합되어 있는 것으로 보아 세포벽을 구성하는 고분자인  $\beta$ -glucan 등의 다당체나 혹은 세포벽과 세포막 사이에 존재하는 단백질에 결합된 것으로 추측된다. Jao (1990) 등은 천연유기게르마늄이 무기게르마늄 및 합성유기게르마늄보다 뛰어난 항암 효과를 보인다고 발표하였으며, 효모를 이용하여 유기게르마늄을 생합성하는 것이 가장 안전하고 효과적인 유기게르마늄 생산 방법이라고 하였다.

녹조류 (Yanagimoto 등, 1983) 및 규조류 (Azam 등, 1974)를 이용하여 무기게르마늄을 유기 게르마늄화 하기도 하였다. Yanagimoto (Yanagimoto, M. 등, 1983)은 조류를 이용하였다. 조류는 알칼리 pH에서 잘 생육하므로 배지의 pH를 높임으로써 게르마늄의 흡수량을 증대시킬 수 있었다. 조류로서는 *Chlorella ellipsoideae*, *Oscillatoria* sp. 및 *Spirulina platensis*를 이용하여 게르마늄 농도별로 시험한 결과 *Oscillatoria* sp.가 *Chlorella ellipsoideae*보다 게르마늄에 민감하여  $20 \text{ mg L}^{-1}$  이상의 고농도에서 생육 저해를 받았다. *Spirulina platensis*의 경우 pH 12.3에서 배양시 cell내에  $4.08 \text{ mg g}^{-1}$ 의 게르마늄을 함유하였다.

식물체가 유기게르마늄의 효과적인 농축수단으로 이용되기도 하였으며, 그 때에 원소주기율 표에서 같은 4A족에 속하며 Ge와 화학적 성질이 비슷한 Si가 함께 연구되었다. Si-H 결합과 Ge-H 결합 강도는 각각 63.0과 56.7 kcal mole<sup>-1</sup>로 비슷하고 (Glockling, 1969), Si와 Ge은 원자반경도 각각 0.134, 0.139 nm로 비슷하다 (Kada 등, 1984). Si와 Ge은 크기도 비슷하기 때문

에 생물학적 시스템에서 Si 대신에 Ge가 치환될 가능성이 있다고 하였다 (Davydov, 1966). Ge을 흡수하는 식물에 있어서 Si와 Ge의 유사성은 중요한 의미가 있다. Werner (1996)는 Ge는 Si의 흡수를 저해한다고 보고하였다. Ge-Si와 Ge-C 결합은 Si-Si와 Si-C 결합보다 약하기 때문에 세포벽의 정상적인 기능을 손상시키는데 황백화는 이러한 이유에 의해 일어난다고 하였으며, 황백화가 일어나는 부위에서 Ge의 축적이 많았다는 것과 일치한다고 하였다 (Matsumoto 등, 1975). 게르마늄은 식물체에서 음전하와 결합하는데 세포벽의 acidic residue는 Ge의 binding site로 작용하기도 한다. 6일된 보리 모종에 20, 40, 60 및 80  $\mu\text{M}$ 의 게르마늄을 7일 동안 처리하여 축적량을 살펴본 결과 보리 뿌리와 줄기에 게르마늄이 축적되었으며 뿌리 보다는 줄기에 축적량이 많았고, 게르마늄 농도의 증가에 비례하여 축적량도 증가하였다고 보고하였다 (Halperin 등, 1995). 게르마늄 40 $\mu\text{M}$  이상에서는 잎이 황화되는 현상이 일어났다. 또 배지의 pH 수준을 4.5, 6.0, 7.5로 달리하였을 때 게르마늄 축적은 pH가 낮을수록 축적량은 높은 것으로 나타났다 (Halperin 등, 1995). 규소를 축적하는 식물인 벼와 규조류에 있어서 규소는 중요한 원소인데 규소의 이동을 연구하는 데는 많은 어려움이 있었다. 벼에서의 게르마늄 연구는 처음 규소의 이동을 연구할 목적으로 사용되었다.  $^{31}\text{Si}$ 는 반감기가 2.62 hr 밖에 되지 않지만  $^{68}\text{Ge}$ 은 반감기가 282일로 길므로 주로 방사성 동위원소를 이용한 Si의 행동 구명시험에 주로 이용되었다. 벼 줄기의 게르마늄은 주로 단백질에서 이루어졌으며, 이는 단백질이 단순히 흡착하는 것이 아니라 특이한 흡착단백질이 있을 것으로 추정하였다 (Matsumoto 등, 1975). 식물에 Ge은 매우 독성이 있으며 벼의 경우 생육을 억제하고 황화현상을 일으킨다고 하였다 (Dakley 등, 1969; Lowry 등, 1951). 규조류에 있어서는 Si의 대사를 방해하고, 규소를 필요로 하는 증식기에 세포의 증식을 늦추는 결과를 나타내었다 (Dakley 등, 1969). Puerner (1990)는 보리, 밀, 오이 및 무우에 대해 게르마늄 농도별로  $\text{NaGeO}_3$ 를 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 및 2.0 mM처리하여 발아와 유묘의 생육을 살펴본 결과 게르마늄 처리농도가 높을수록 4종의 식물 모두 발아율이 떨어지고 유묘의 줄기 성장에 저해를 받았다고 하였다. 게르마늄을 필요로 하는 식물인 보리는 게르마늄 처리 후  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 의 공급으로 유묘의 생육저해가 완전히 해결되었고 잎의 황화현상도 감소하였으나, 밀 등의 다른 작물은 생육저해가 해결되지 않았다고 하였다. 식물체내에서 Si와 Ge의 행동이 비슷하다면 Ge은 Si 연구를 위한 유용한 도구가 될 수 있다. Datnoff (2001)등은 Si와 Ge은 식물체 흡수에 유사성이 있다고 보고하였으며 Table 3-5에서 보면 규소함량이 많은 작물이 게르마늄 함량도 높았다. 벼는 뿌리를 제거함으로 게르마늄 함량이 현저히 줄었지만 나팔꽃은 오히려 뿌리제거로 함량이 높았다. 이로써 식물의 게르마늄 흡수는 3가지 방식이 있는데 active한 벼와 passive한 완두콩, rejective한 나팔꽃이 있다. 벼에 게르마늄은 식물체 내부액에 함량이 높고 게르마늄 흡수는 DNP, 2,4-D, NaCN 및 Si에 의해 저해를 받는다. 이는 식물체 뿌리가 게르마늄과 규소를 구분하지 못한다고 생각할 수 있고, 규소의 흡수 치환으로 게르마늄이 사용될 수도 있다는 것이다. 하지만 게르마늄 흡수는 식물체 잎에 갈색반점의 독성을 일으킨다.



Table 2-5. Si ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ )  $50 \text{ mg L}^{-1}$ 과 Ge ( $\text{H}_4\text{GeO}_4$ )  $5 \text{ mg L}^{-1}$ 을 함유한 양액재배 작물에서의 Si 및 Ge 함량 (Datnoff 등, 2001)

Plant species	Si (%) <sup>a</sup>	Ge ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) <sup>a</sup>
Rice	6.61	3,140
Wheat	3.81	1,720
Maize	2.23	105
Kidney bean	1.24	860
Tomato	0.11	140
Morning glory	0.11	105

※ The plants were treated for 3 to 4 weeks,

<sup>a</sup>Dry weight basis.

Ma (2002)는 몇 가지 작물을 규산  $47 \text{ mg L}^{-1}$  과 germanic acid  $1-10 \text{ mg L}^{-1}$ 을 함유하는 양액에서 재배하였을 때 모든 식물은 게르마늄 처리에 의해 생육 저해를 받았고 저해 정도는 벼 > 옥수수, 오이 및 완두콩 > 토마토 > 나팔꽃 순이었다고 하였다. 벼의 경우 생육저해가 심했는데 벼 잎에 황색반점이 발생하였다. 게르마늄에 대한 저항성은 게르마늄과 규산 함유 능력과는 부의 관련이 있었다. 게르마늄의 흡수는 규소의 공급에 의하여 억제된다. 게르마늄의 독성은 벼 (논) > 벼 (밭) > 옥수수 > 완두콩 > 귀리 순이었다. 이러한 생육저해 정도는 게르마늄과 규소의 흡수 능력과 관계가 있다. Ge-induced 저해는 모든 작물에서 규산첨가에 의해 경감되었지만 규산 흡수 능력이 높은 식물에서 더욱 명백하였다. 게르마늄의 생리학적 효과는 규소와 다르지만 뿌리에 의한 게르마늄의 흡수는 규소와 비슷하다. Ge과 동일 족에 속하는 규소를 많이 흡수하는 벼는 Ge을 많이 흡수한다고 밝힌 바 있으며 (高橋英一, 蕭聰明 三宅靖人, 1976), 또한 水耕栽培時 방사성  $^{68}\text{Ge}$ 을 이용하여 식물의 Ge 흡수에 대하여 검토한 결과, 벼의 줄기 밑부분의 자른 부위에서 채취한 분비액 중의  $^{68}\text{Ge}$ 농도는 단시간에 外液의 수십 배에 달했다고 한다 (高橋英一, 蕭聰明 三宅靖人, 1976). 珪酸植物인 벼를 규소와 동족원소이면서 화학적 성질이 비슷한 Ge을 수경액에 넣어 砂耕栽培했을 때 식물체 내 Ge 함량은 현저히 높은 반면 Ca 함량은 현저히 낮았고 非珪酸植物인 토마토에서는 반대의 경향을 보였다고 한다 (高橋英一, 蕭聰明 三宅靖人, 1976). Ge이 다량 함유된 식물체는 약학 및 의학 분야에서 관심이 많을 것 같아 그의 함량증대를 위해 水野卓 (1988)은 유기 Ge  $1,000 \text{ mg L}^{-1}$  수용액에 상수리나무를 침지하고 가압 찌질하여 Ge을 흡수시킨 후 영지 버섯종균을 접종하여 재배 하였으며, 조식배양 및 포장을 통하여 실험한 바 있다 (Kwon 등, 1996; Namkoong, 1996). Ge을 많이 함유하고 있다고 알려진 명일엽 (明日葉)과 인삼 (人蔘)을 이용하여 기내배양을 통한 연구에서 명일엽 유래의 캘러스가 인삼 유래의 캘러스 보다 Ge을 많이 흡수하였다 (韓昶烈 등, 1980). Ge 함량 증대를 위한 실험으로 포장에서 명일엽에  $\text{GeO}_2$ 와 구연산  $1 \text{ mM}$ 을 혼용 처리하면  $\text{GeO}_2$  단용 처리구보다 Ge 흡수가 증가되었다. 또한 器內에서 명일엽과 동일 屬에 속하는 강활 (羌活)은

GeO<sub>2</sub> 사용량 증가는 캘러스나 식물체중 Ge 함량을 증가시키거나 기타 무기성분 함량은 감소되는 경향이었고 구연산 0.1-1 mM 사용으로 약간 증가되는 경향이였다 (Park 등, 1996). Lee (1995)등은 명일엽과 일당귀를 기내배양하여 게르마늄 흡수량 시험을 하였는데 식물 부위별 Ge함량 분석결과 명일엽은 일당귀에 비하여 전체적으로 약 2.1배 높았고 부위별로는 명일엽에서 엽병, 줄기, 잎의 순으로 함량이 많았다. 기내배양시 Ge 처리와 callus 증식과의 관련한 연구로는 고려인삼에서 MS배지에 GeO<sub>2</sub>을 첨가시 5 mg L<sup>-1</sup> 까지는 callus 증식이 잘 되었으나 50, 100 mg L<sup>-1</sup>으로 농도가 증가할수록 저지되었다. Park (1996)등은 강활의 캘러스 및 식물체중 Ge 함량에 미치는 GeO<sub>2</sub>와 구연산의 영향을 구명하기 위하여 식물체 부위별로 캘러스를 유도하고 캘러스 증식시 GeO<sub>2</sub>와 구연산을 농도별로 처리하여 증식율 및 캘러스의 Ge 함량을 조사하였으며 강활을 pot에 재배하여 GeO<sub>2</sub>와 구연산을 농도별로 사용하여 식물체 중의 Ge 함량을 분석하였다. 동진벼를 이용한 Ge의 종류 및 농도에 따른 캘러스내 Ge 함량은 Ge 처리농도가 높을수록 증가되었는데, Ge 사용량이 100 mg L<sup>-1</sup> 이하에서는 무기게르마늄 (GeO<sub>2</sub>) 처리가 유기게르마늄 (Ge-132) 처리보다 캘러스내 Ge 함량이 높았으나, 그 이상의 농도에서는 유기게르마늄 처리가 무기게르마늄처리 보다 캘러스 내 Ge 함량이 높았고 캘러스 활력도 좋았다고 하였다. 배지의 pH가 낮을수록 캘러스의 활력은 떨어지나 캘러스 내 Ge 함량은 높았으며, citric acid 와 myo-inositol 0.1-1.0 mM을 배지에 처리한 경우 무사용보다 캘러스 생육이나 캘러스 내 Ge 함량이 증가하였는데, citric acid 보다는 myo-inositol의 사용에서 더 증가되었다고 하였다 (Kwon 등, 1996).

프랑스 국경 루르드 지역 샘물의 질병치료 효과 보고서에서 샘물에 게르마늄의 함량이 높다는 것이 발견된 이후부터 게르마늄에 대해 많은 연구자들이 관심을 갖게 되었다. 무기게르마늄은 인체에 유해하지만 유기게르마늄은 다양한 약리효과가 있어 1967년 Asai Germanium Research Institute에서 무기물인 이산화게르마늄으로부터 유기게르마늄인 Ge-132 (carboxyethylgermanium sesquioxide)를 합성한 이후 유기게르마늄의 약리효과에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

게르마늄은 반도체산업의 재료, 독성 및 약리효과 측면에서 많이 연구가 수행되었지만 외국의 경우도 게르마늄의 농업적 측면에서 연구 결과는 많이 없는 편이다. 우리나라 경우 미생물을 이용한 유기게르마늄 연구와 작물에 대한 게르마늄 연구는 최근에 몇몇 연구자들을 통하여 기내배양을 중심으로 이루어졌으며, 농업적 측면에서의 연구는 거의 없는 실정이다.

## 제 1 절 국내의 기술개발 현황

게르마늄 용해수로 재배한 콩나물의 Ames test와 SOS Chromo test에서 항돌연변이 효과를 살펴본 결과 일반콩나물의 돌연변이 비율은 38%임에 비해 60% 이상의 항돌연변이 효과를 보였으며, 한 등은 유기게르마늄 수용액으로 콩나물을 재배한 결과 최고 170 mg kg<sup>-1</sup>까지 게르마늄을 함유하였고, 무기게르마늄 수용액보다는 유기게르마늄 수용액으로 조제하여 공급하였을 때 흡수량은 더 높았다고 보고하였다.

최근 게르마늄은 한방약재, 키토산, 인삼, 칼슘, 녹차, 목초액, 참숯 및 맥반석 등의 농자재와 함께 유기게르마늄이 약리효과를 가진다는 보고로 기능성 농산물 생산을 위한 자재로 사용되고 있다.

본 연구자들은 식물이 게르마늄을 흡수하는지를 알아보기 위해 미나리와 벼에 게르마늄을 처리하여 흡수량을 정량하였으며, 또 인위적인 게르마늄 공급에 의해 게르마늄함유 농산물을 재배하는 것 보다 농경지 자체의 게르마늄 함량을 모니터링하고 게르마늄 함량이 높은 지역에서 생산된 농산물의 게르마늄 함량을 분석하여 그 지역에서 생산된 농산물은 지역특화 및 부가가치가 높은 기능성농산물로 브랜드화 할 수 있을 것으로 생각되어 경남지역의 일부 밭 토양의 게르마늄 함량을 모니터링 하였다 (Fig. 2-1).

밭 토양 중 게르마늄 함량을 모니터링 한 결과 4 mg kg<sup>-1</sup>이상으로 높은 지점도 있었으며, 토양 중 게르마늄 함량이 높은 지역에서 채취한 작물 중 감자, 고추, 콩, 깻잎, 배추 및 열무 등에서 게르마늄 함량이 높았고, 토양의 화학성분과 작물의 게르마늄 흡수량과의 상관관계는 Table 2-1와 같으며, 토양 pH와 작물의 게르마늄 흡수량과는 고도로 유의한 부의 상관이 있었다.

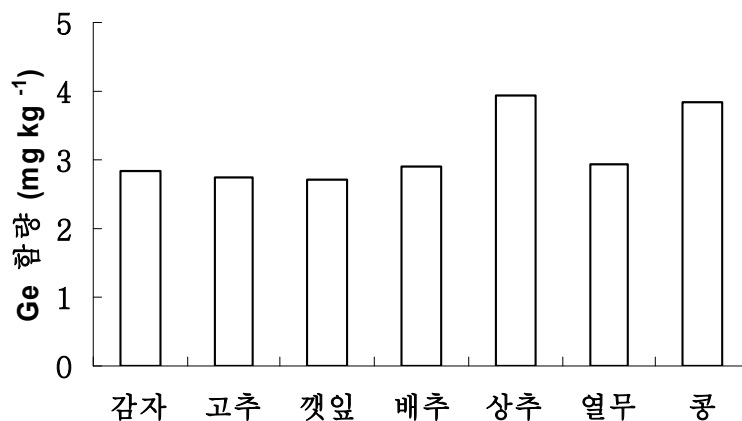


Fig. 2-1. 밭 토양 중 게르마늄 함량 1 mg kg<sup>-1</sup> 이상인 지역에서 채취한 작물 종류별 게르마늄 함량.

Table 2-6. 식물체 게르마늄 함량과 토양화학성과의 상관관계

구 분	pH	OM	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	Ca	Mg	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N
상관계수 (r)	-0.506**	0.006	0.105	0.031	-0.360*	-0.357*	0.477**	0.214

본 연구자가 2005년 경남농업기술원에서 수집한 게르마늄함유 농산물의 게르마늄 함량을 분석한 결과 대부분이 자연상태에서의 함유량 수준이었으며, 엽채류에서는 약간 높았는데 이는 무기게르마늄을 엽면살포하여 엽면에 잔존하는 게르마늄이었다 (Table 2-2). 따라서 무기게르마늄이 식물체로 흡수된 것이 아니라 엽면에 잔존한다면 우리의 건강과 안전성에 문제를 일으킬 수 있으며, 게르마늄 농자재 역시 게르마늄 함량이 불분명한 상태에서 게르마늄함유 농작물 재배를 위해 투입되고 있어 혼란이 가중되고 있다.

Table 2-7. 2005년 시중 게르마늄함유 농산물의 게르마늄 분석

구 분	작 물	함량 (mg kg <sup>-1</sup> )	비 고
곡 류	쌀	0.010-0.070	자연상태의 함유량 수준
과채류	토마토	불검출-0.009	자연상태의 함유량 수준
	딸기	불검출-0.008	자연상태의 함유량 수준
	오이	0.008-0.025	자연상태의 함유량 수준
	수박	불검출-0.008	자연상태의 함유량 수준
엽채류	부추	0.988-1.270	게르마늄 엽면살포로 높음
	미나리	0.110-0.743	게르마늄 엽면살포 높음
	깻잎	0.178-0.444	게르마늄 엽면살포 높음
과 수	단감	불검출-0.013	자연상태의 함유량 수준
	배	불검출-0.015	자연상태의 함유량 수준

\* 경남농업기술원에서 수집 분석한 자료임

1988년 이후 우리나라의 친환경농산물 생산량은 매년 증가하고 있는 추세에 있으며, 친환경 유기농산물의 과잉공급 하에서도 경쟁할 수 있는 농산물은 기능성 농산물이라 할 수 있다. 특히, 2005년 우리나라 게르마늄 농자재 시장 규모는 400억 정도로 추정되며, 매년 증가하는 추세이다. 게르마늄 함유 농산물 생산을 위한 게르마늄 농자재 개발, 게르마늄함유 농작물 재배 생산기술 개발 및 재배된 농산물의 안전성과 기능성 검증 연구결과는 국내 농산물의 경쟁력 확보와 농산물의 브랜드화에 의한 농가소득 증대뿐만 아니라, 우리나라 농산물의 해외 수출도 가능할 것으로 판단된다.

다양한 종류의 게르마늄 관련 농자재가 농업에 사용되고 있으나 농자재와 게르마늄함유 농산물에 대한 게르마늄 함량이 얼마인지 불분명한 상태에서 농산물이 유통되고 있으며, 기능성을 목적으로 게르마늄을 사용하고 있지만 게르마늄함유 농산물의 기능성 검정에 대한 연구는 없었다.

따라서 게르마늄함유 농자재와 농산물 중 게르마늄 함량을 분석하여 문제점을 파악하고 농작물의 게르마늄 흡수 효율을 높이기 위해 흡수 전이가 쉬운 게르마늄 농자재 개발이 필요하며, 작물에 있어 게르마늄 적정 처리농도 설정과 게르마늄 흡수특성 구명이 필요하다. 또 생산된 게르마늄함유 농산물이 유기게르마늄화 되었는지에 대한 증명, 기능성 검정에 의한 게르마늄 농산물의 안전성 연구가 절실히 필요하다.

## 제 2 절 국외의 기술개발 현황

Ge-132는 1967년 Asai Germanium Research Institute에서 무기물인 이산화게르마늄으로부터 합성한 유기게르마늄인 carboxyethylgermanium sesquioxide[ $O_3(GeCH_2COOH)_2$ ]이고, 1978년 Ge-132가 methylcholathrene에 의해 마우스에서 발생하는 종양을 방지하는 효과가 있다는 Kumano 등의 보고 이후, Ge-132의 항종양 효과가 알려지게 되었으며, 이러한 항종양 효과는 interferon 생성, macrophage 활성화증대, T lymphocyte와 같은 숙주 방어 기전을 통한 것이라고 보고 하였다.

게르마늄(Germanium)은 무기게르마늄과 유기게르마늄으로 분류할 수 있는데, 무기게르마늄( $GeO_2$ )은 인체 내 유입시 빈혈, 신기능장애, 근육 장애를 유발하는 것으로 알려져 있으나(Obara et al., 1991), 유기게르마늄은 항종양 효과(Jang et al., 1991), 항돌연변이 효과(Mochizuki and Kada, 1982), natural killer 세포 및 macrophages의 활성화를 포함하는 면역강화 작용(Suzuki et al., 1986)과 virus 감염의 치료(Aso et al., 1985) 관절염 치료 효과와 같은 항염증 작용(Dimartino, 1986), 해열·진통 작용(Suzuki and Taguchi, 1983), 중금속 해독 작용(Lee and Chung, 1991) 및 운동성 증가(Ho et al., 1990) 등의 다양한 약리작용을 가지고 있다.

토양 중 게르마늄 함량이 낮기 때문에 작물체중 게르마늄 함량이 낮아 무기게르마늄을 사용하여 유기게르마늄화 하기위한 효과적인 농축의 수단으로 다양한 연구들이 수행되었으며, 무기게르마늄을 유기게르마늄화하기 위한 수단으로는 미생물, 효모(Kehlbeck, 1983; Nobohiro et al., 1980; Wei, 1992)류 및 균조류를 이용하기도 하였으며, 몇몇 연구자는 유기게르마늄함유 식물체를 개발하기 위하여 일당귀와 인삼(Lee et al., 1994), 강활(Park et al., 1996)을 이용하였다.

Ma와 Takahashi (2002)는 몇 가지 작물을  $47 \text{ mg L}^{-1}$  규산 과  $1-10 \text{ mg L}^{-1}$  게르마늄산을 함유하는 양액에서 재배하였을 때 모든 식물은 게르마늄 처리에 의해 생육저해를 받았고, 저해 정도는 벼 > 옥수수, 오이 및 완두콩 > 토마토 > 나팔꽃 순이었다고 하였다.

이외에도 Ge-132는 benzopyrene이나 radiation에 대한 항돌연변이 효과, natural killer 세포의 활성화와 macrophage, T suppressor cell의 활성화를 포함하는 면역강화 작용과 virus감염의 치료, 관절염 치료 효과와 같은 항염증 작용, 해열·진통 작용, 중금속 해독 작용 및 운동성 증가 등의 다양한 약리 작용을 가지는 것으로 보고되었다.

Iima 등은 합성원료인 무기게르마늄( $GeO_2$ )은 장기 복용한 환자에서 빈혈, 신기능 장애, 신경병증, 근육장애를 유발하는 것으로 알려져 있으며, 랫드에서도 신기능 장애와 근육장애를 일으키는 것으로 알려져 있다.

Klapcinsca와 Chmielowski는 *Pseudomonas putida* cell내에서 게르마늄의 축적은 주로 souble fraction에서 이루어지고, 이중 대다수가 핵산과 단백질에 결합되어 있음을 전자현미경으로 확인하였다.

Wei는 효모가 고농도의 무기게르마늄을 흡수할 수 있으며, 효모균체 내에 축적된 게르마늄의 95%이상이 유기게르마늄임을 밝히고, 효모가 무기게르마늄을 유기게르마늄으로 전환하는 능력이 있음을 보고하였다. 이후 게르마늄의 항종양 효과가 인정됨으로서 효모를 이용한 유기게르마늄 생산은 건강식품 소재로서 중요한 의미를 갖게 되었다.

Nakada 등은 동물실험을 통하여 게르마늄이 수술 후의 회복과 면역력을 높인다고 하였는데, 이는 게르마늄이 수술 후의 탐식 세포들, 백혈구의 염색질들, 혈액 주위의 림프구들, 또 이들의 콘트롤 그룹 등의 거부 반응에 대한 면역학적인 반응의 증대와 인터페론 유도체로 작용하였다.

Isiwata등은  $[(O_{1/2})_3GeCH_2COOH]_n$ 의 화학적 구조를 가진 유기게르마늄 화합물인 propagermanium이 일본에서는 B형 간염의 치료제로 사용되어져 왔으며, 이는 B형 간염의 항원을 제거 또는 항체를 증가시키는 작용을 하는 것으로 알려져 있다.

Ge과 Si는 원소의 크기도 비슷하기 때문에 생물학적 시스템에서 Si 대신에 치환될 가능성도 있는데, 실질적으로 규산식물인 벼에 규소와 동족인 게르마늄을 수경액에 넣어 재배하였을 때 식물체내 게르마늄 함량은 현저히 높았다.

이상의 연구결과와 같이 게르마늄의 약리적인 효과 및 미생물을 통한 무기게르마늄의 유기게르마늄 전환 연구는 있으나 농작물을 통한 연구 수행결과는 거의 없었다.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 농산물중 게르마늄 함량 분석을 위한 시료 전처리 최적화 방안

#### 1. 서론

일반적으로 농작물내의 자연적인 게르마늄 함량은 매우 낮으므로 게르마늄의 정확한 분석을 위해서는 게르마늄 회수율이 높은 전처리 방법과 정밀도와 정확도가 높고 재현성과 검출한계가 고려된 분석방법이 검토되어야 한다. 최근에는 Gas chromatography, 수소화물유도결합 플라즈마분광법, Osteryoung Wave Voltammetry법, Differential Pulse Polarography, Adsorption Stripping Voltammetry법 등이 이용되어 분석감도가 크게 향상되어 극미량까지 측정할 수 있는 단계에 이르렀다. 그러나 게르마늄은 전처리시 회화과정의 낮은 온도에서도 휘발성인 GeO나 GeS로 되어 손실을 일으키므로 matrix modifier를 사용해서 분석해야 하는 것으로 알려져 있다. 또한 분해시 분해액의 염소기와 결합하면 GeCl<sub>4</sub>가 되어 비등점 (84.0°C)이 낮아지므로 높은 온도로 분해할 경우 휘발하기 쉽기 때문에 분해온도의 영향을 많이 받는다. 따라서 효율적인 게르마늄 분석을 위해서는 첨단기기를 사용하는 것도 필수이지만 효율적인 시료특성에 맞는 전처리 과정이 매우 중요하다.

따라서 본 시험연구의 목적에 맞는 가장 효율적인 시료전처리 과정을 찾기 위하여 여러가지 시료분해장치, 분해용액, 분해용액농도, 분해시간 등을 검토하였고, 정확도와 정밀도를 고려한 분석결과의 타당성을 검토하기 위한 분석방법들을 비교 검토하였다.

#### 2. 시료분해장치 제작

시료분해장치는 Fig. 1-1에서 보는바와 같이 정확한 온도조절이 가능하고 열전도효율이 정밀한 장치를 설계 제작하여 사용하였다. 시료 가열판은 알루미늄판 (L20 cm × W15 cm × H8 cm)을 이용하여 직경 2.8 mm, 길이 7.8 cm의 홈을 뚫었다. 시료분해용기는 직경 2.8 mm, 높이 15 cm의 유리재질의 용기로 제작하였고 분해시 게르마늄의 휘발을 최소화할 수 있는 탈부착형 여두형 뚜껑을 제작하여 사용하였다.



Fig. 1-1. 시료분해장치



### 3. 케르마늄 정량

케르마늄 정량은 ICP는 ICP-AES (Optima 3300DV, Perkin-Elmer, USA)와 ICP (ICPE-9000, Shimadzu, Japan)를 사용하였고 ICP-MS는 ICP-MS (Perkin-Elmer, USA)와 ICP-MS (ICP-MS, Agilent 7500, USA)를 이용하여 분석하였으며, 분석을 위한 기기의 운전조건은 Table 1-1 및 1-2와 같다.

Table 1-1. ICP-MS 운전조건

RF Power forward	1,200 W
Argon flow plasma	16.0 ± 0.6 L min <sup>-1</sup>
Nebulizer	1.00 L min <sup>-1</sup>
Auxiliary	0 L min <sup>-1</sup>
Cone (sampler, skimmer)	Nikel
Nebulizer	Ryton cross flow
Resolution	0.8 ± 0.1
Replicate time	0.1 s
Sweeps/replicate	6
Number of replicates	6
Point across peak	3
Vacuum (AN)	1-9 × 10 <sup>-4</sup> Pa
Vacuum (BK)	1-2 × 10 <sup>1</sup> Pa
Vacuum (IF)	2-5 × 10 <sup>2</sup> Pa

Table 1-2. ICP-AES 운전조건

RF Power forward	1,300 W
Argon flow plasma	15.0 L min <sup>-1</sup>
Nebulizer	0.8 L min <sup>-1</sup>
Auxiliary	0.5 L min <sup>-1</sup>
Resolution	Normal (Fixed)
Sweeps/replicate	3
Number of replicates	6
Point across peak	3
Sample flush	
Flush time	30 s
Flush rate	40 mL min <sup>-1</sup>
Sample flow rate	1.0 mL min <sup>-1</sup>
Read delay	30 sec
Delay read	60 sec
Flush time	30 s

#### 4. 분해액 종류별 게르마늄 회수율 검토

식물체 분해액 종류별 게르마늄의 회수율을 비교 검토하기 위하여 분해액으로 conc. HNO<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 1 : 1, HNO<sub>3</sub> : HClO<sub>4</sub> = 1 : 1, HNO<sub>3</sub> : HClO<sub>4</sub> = 1 : 2, HNO<sub>3</sub> : HClO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 1 : 1 : 1 및 HNO<sub>3</sub> : HClO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 10 : 4 : 1의 6종류를 사용하여 게르마늄표준액과 게르마늄이 함유된 식물체 (상추)의 게르마늄 회수정도를 조사하였다. 모든 분해시약 및 게르마늄표준용액은 ICP-MS grade인 Suprapur-grade (Merck)를 사용하였다.

게르마늄 표준물질을 이용한 회수율 검토는 게르마늄 표준액 (Ge 1,000 mg L<sup>-1</sup>)을 사용하여 각 분해액에 게르마늄이 1.0 mg kg<sup>-1</sup> 되도록 처리하여 제작한 시료분해장치에서 120°C에서 4시간동안 분해 후 여과 후 10 mL로 정용하여 게르마늄 함량을 ICP-MS를 사용하여 정량하였다.

게르마늄을 실제 함유하고 있는 식물체의 회수율 검토는 NIST의 Standard Reference Material 1547 peach leaves (SRM-1547), 한국표준과학연구원 (KRISS)의 Water Dropwort Powder (CRM 108-05-001)와 본 연구에서 이용한 실제 게르마늄을 함유한 상추를 사용하여 비교 검토하였다. 각 시료 분말 0.2 g을 특수 제작한 시료분해관에 넣고 분해액을 각각 5ml씩 가하여 40°C로 over night시킨 다음 80°C에서 4시간 동안 분해한 후 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 2-3방울을 가하여 100°C에서 30분 가열하였다. 분해액을 Whatman No. 6를 사용하여 여과한 후 3차 증류수로 10 mL로 정용하여 ICP-MS 또는 ICP를 사용하여 게르마늄을 정량하였다.

분해액 종류별 게르마늄 회수율 (Table 1-3)은 conc. HNO<sub>3</sub>과 HNO<sub>3</sub> : HClO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 10 : 4 : 1 분해액을 사용하였을 때 높았으며 이때의 평균 회수율은 각각 약 94.3 및 89.7% 이었다. HNO<sub>3</sub> : HClO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 1 : 1 : 1 용액에서는 회수율 57.6%로서 매우 낮았다. 그리고 식물체중 게르마늄 함량을 분석한 결과도 회수율이 가장 높았던 conc. HNO<sub>3</sub>에서 36.7 mg kg<sup>-1</sup>으로 가장 높았으며 HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 1 : 1 용액에서 21.5 mg kg<sup>-1</sup>으로 가장 낮았다. 반면 분해액 종류별 회수율 시험에서 회수율이 높았던 HNO<sub>3</sub> : HClO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 10 : 4 : 1 처리에서는 26.3 mg kg<sup>-1</sup>으로 낮아져 실제 게르마늄을 함유하고 있는 식물체에서는 차이가 있었다. 따라서 이후의 게르마늄 함량 분석을 위한 분해액으로는 conc. HNO<sub>3</sub>를 사용하였다.

Table 1-3. 분해액 종류별 게르마늄 회수율 및 식물체중 게르마늄 함량

분해용액	게르마늄 회수율 (%)	식물체 (상추)중 게르마늄 함량 (mg kg <sup>-1</sup> )
Conc. HNO <sub>3</sub>	94.3 ± 1.4	36.7 ± 0.8
HNO <sub>3</sub> : H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 1 : 1	89.7 ± 1.6	21.5 ± 1.7
HNO <sub>3</sub> : HClO <sub>4</sub> = 1 : 1	71.2 ± 0.9	32.9 ± 3.1
HNO <sub>3</sub> : HClO <sub>4</sub> = 1 : 2	67.5 ± 2.1	30.6 ± 0.9
HNO <sub>3</sub> : HClO <sub>4</sub> : H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 1 : 1 : 1	59.6 ± 1.8	29.1 ± 2.5
HNO <sub>3</sub> : HClO <sub>4</sub> : H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 10 : 4 : 1	83.7 ± 1.6	26.3 ± 4.2

### 5. 분해용액 (HNO<sub>3</sub>) 농도별 게르마늄 회수율 검토

최적분해용액으로 선정된 HNO<sub>3</sub>와 H<sub>2</sub>O의 비율을 달리하여 게르마늄 회수율 정도 (분해조건 : 분해용액 5 mL, 120°C, 4시간)를 검토한 결과 (Table 1-4), 표준용액 중 게르마늄 회수율은 분해용액 (HNO<sub>3</sub>) 농도에 따른 차이 없이 거의 일정한 값을 보였다. 그러나 식물체 중 게르마늄 함량은 conc. HNO<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O = 5 : 1, HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O = 2 : 1, HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O = 1 : 1에서는 큰 차이 없이 비슷하였으나 산의 농도가 낮은 HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O = 1 : 2, HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O = 1 : 5에서는 크게 감소하였다. 따라서 본 시험의 식물체 분해조건에서는 HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O = 1 : 1의 비율이 가장 적당한 것으로 판단되어 이후의 실험에서는 분해용액 농도를 HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O = 1 : 1의 비율로 사용하였다.

Table 1-4. HNO<sub>3</sub> 농도별 게르마늄 표준용액중 게르마늄 회수율 및 식물체중 게르마늄 함량

분해액 농도	표준용액중 게르마늄 회수율 (%)	식물체중 게르마늄 함량 (mg kg <sup>-1</sup> )
conc. HNO <sub>3</sub>	87.7 ± 2.1	38.1 ± 0.8
HNO <sub>3</sub> : H <sub>2</sub> O = 5 : 1	86.2 ± 1.7	37.7 ± 2.7
HNO <sub>3</sub> : H <sub>2</sub> O = 2 : 1	85.6 ± 2.3	38.6 ± 1.7
HNO <sub>3</sub> : H <sub>2</sub> O = 1 : 1	86.3 ± 1.3	37.4 ± 2.7
HNO <sub>3</sub> : H <sub>2</sub> O = 1 : 2	84.6 ± 0.7	26.5 ± 1.2
HNO <sub>3</sub> : H <sub>2</sub> O = 1 : 5	81.5 ± 4.1	21.3 ± 1.5

### 6. 분해온도에 따른 게르마늄 회수율 검토

게르마늄은 전처리시 분해과정 중 낮은 온도에서도 휘발성인 GeO나 GeS로되어 손실을 일으키므로 matrix modifier를 사용해서 분석해야만 하는 것으로 알려져 있다. 또한 분해과정 중에 분해액의 염소기와 결합하면 GeCl<sub>4</sub>가 되어 비등점 (84.0°C)이 낮아지므로 높은 온도로 분해할 경우 쉽게 휘발할 수 있기 때문에 전처리 과정중 분해온도는 분석 값에 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다.

여러가지 분해온도에서 게르마늄회수율을 조사한 결과(Table 1-5), 게르마늄 표준용액중 게르마늄 회수율은 전체적으로 분해온도가 높아질수록 감소하는 경향이였으며 100°C 이하의 비교적 낮은 온도에서는 큰 차이 없이 약 95% 이상의 높은 회수율을 보였으나 150°C와 200°C에서는 크게 감소하였다. 그리고 식물체 중 게르마늄 함량은 분해온도 80°C와 100°C에서 높게 검출되었다. 낮은 온도인 60°C에서는 외관상으로 볼 때 분해정도가 불완전하였으며 게르마늄 검출량도 낮았다. 그리고 분해온도 150 및 200°C에서도 80°C에 비하여 게르마늄 검출량이 크게 감소하였다.

Table 1-5. 분해온도별 게르마늄 표준용액 중 게르마늄 회수율 및 식물체중 게르마늄 함량

분해온도	표준용액중 게르마늄 회수율 (%)	식물체중 게르마늄 함량 (mg kg <sup>-1</sup> )
60℃	98.5 ± 0.9	31.8 ± 1.2
80℃	96.1 ± 0.7	40.2 ± 2.6
100℃	95.6 ± 1.3	38.1 ± 3.3
150℃	89.8 ± 1.3	30.6 ± 4.7
200℃	71.2 ± 2.1	25.4 ± 2.5

### 7. 식물체내 게르마늄 최적 분석조건

식물체중 게르마늄 분석시험을 위한 시료 전처리과정은 상기의 결과들과 부가적인 시험결과들을 토대로 건조시료 0.2g에 분해용액으로 HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O = 1 : 1용액 3 mL을 첨가하여 제작한 분해장치를 이용하여 45℃에서 over night시킨 후 분해용액 2 mL을 첨가하여 80℃에서 4시간 분해시킨 다음, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 50 μL을 첨가하여 100℃에서 30분 더 분해시켰다. 분해된 시료용액은 3차 증류수로 10 mL로 정용하여 ICP 또는 ICP-MS를 이용하여 분석하였다. 또한 시료 전처리와 분석의 질과 정도관리를 위해 NIST의 Standard Reference Material 1547 peach leaves 과 한국표준과학연구원 (KRISS)의 Water Dropwort Powder (CRM 108-05-001)를 상기 시료 전처리와 동일한 방법으로 같이 전처리하여 회수율을 검토하였으며 시료의 기기 분석시에는 기기상에서 충분한 running time을 두었으며 시료 6개 분석시마다 표준용액을 분석하여 분석 결과의 재현성을 확인하였다.

### 8. 연구결과 요약

게르마늄은 전처리시 회화과정의 낮은 온도에서도 휘발성인 GeO나 GeS로 되어 손실을 일으키고 비등점 (84.0℃)이 낮아 높은 온도로 분해할 경우 휘발하기 쉬우므로 효율적이고 정확한 게르마늄 분석을 위해서는 첨단기기의 사용과 분석시료 특성에 가장 적합한 시료전처리 과정이 매우 중요하다. 본 연구에서도 시험연구의 목적에 맞는 가장 효율적인 시료전처리 과정을 찾기 위하여 정확한 온도조절이 가능하고 열전도효율이 정밀한 시료분해장치를 제작하여 최적의 분해용액, 분해용액농도, 분해시간 등을 검토하였고, 정확도와 정밀도를 고려한 분석결과 타당성을 검토하기 위한 분석방법들을 비교 검토하였다.

분해액 종류별 게르마늄 회수율은 분해액으로 conc. HNO<sub>3</sub>용액을 사용하였을 때 높았으며 이때의 평균 회수율은 각각 약 94.3%이었다. 분해용액 농도별 게르마늄 회수율 (분해조건 : 분해용액 5 ml, 120℃, 4시간)은 분해액 (HNO<sub>3</sub>)과 H<sub>2</sub>O의 1 : 1 용액이 가장 적당하였다. 여러가지 분해온도별 게르마늄회수율은 분해온도가 높아질수록 감소하는 경향이였으며 80-100℃ 범위의 온도에서는 큰 차이 없이 약 95% 이상의 높은 회수율을 보였으나 120℃이상에서는 크게 감소하였다.

따라서 이러한 결과들을 토대로 식물체중 게르마늄 분석시험을 위한 최적의 시료 전처리과정을 정립하였으며, 그 과정은 건조시료 0.2 g에 분해용액으로  $\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1$  용액 3 mL을 첨가하여 제작한 분해장치를 이용하여 45°C에서 over night시킨 후 분해용액 2ml을 첨가하여 80°C에서 4시간 분해시킨 다음,  $\text{H}_2\text{O}_2$  50  $\mu\text{L}$ 을 첨가하여 100°C에서 30분 더 분해시킨 후 3차 증류수로 10 ml로 정용하여 여과 후 분석시료로 사용하였다.

## 제 2 절 게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술 개발

### I. 게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술 개발

#### 1. 재료 및 방법

##### 가. 공시 재료

##### (1) 공시 토양

본 시험은 경남 진주시 초전동에 위치한 경상남도농업기술원 시설하우스에서 실시하였으며, 실험에 사용한 공시 토양의 이화학적 특성은 Table 2-1에서 보는 바와 같다. 공시 토양의 토성은 Table 2-2에서 보는 바와 같이 모래, 미사 및 점토가 각각 2.9, 86.8 및 10.3%로 국제토양학회 분류기준에 의해 미사질양토였다.

Table 2-1. 공시 토양의 이화학적 특성

pH (1:5)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	O.M. (g kg <sup>-1</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	SiO <sub>2</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	Ex.Cat (cmol+ kg <sup>-1</sup> )		
					K	Ca	Mg
5.8	0.52	23.1	361	100	0.33	5.9	1.5

Table 2-2. 공시 토양의 토성

Soil texture	Sand	Silt	Clay
	(%)		
Silt loam	2.9	86.8	10.3

##### (2) 공시 작물

공시 작물은 증만생종인 동진벼를 사용하였으며, 벼는 초장 10 cm인 어린모를 6월 초순에 pot에 이양하여 10월 말에 수확하였다.

##### (3) 공시 게르마늄

실험에 사용된 공시 게르마늄은 GeO<sub>2</sub>, Ge-132 (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>Ge<sub>2</sub>O<sub>7</sub>), Ge 표준용액 (일반분석용, 1000 mg L<sup>-1</sup>) 및 (주)캐러스에서 수도작용 게르마늄 농자재로 생산되는 액상게르마늄 (6000 mg L<sup>-1</sup>)을 사용하였다. GeO<sub>2</sub> 및 Ge-132 (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>Ge<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)는 수돗물에 녹여 액상으로 조제한 후 일정 농도로 희석하여 사용하였으며, Ge 표준용액 및 수도작용 액상 게르마늄은 수돗물에 일정농도로 희석하여 사용하였다.

#### 나. 실험방법

##### (1) 유통중인 게르마늄 함유 농산물 중 게르마늄 함량조사

유통중인 게르마늄 함유 농산물 중 게르마늄 함량을 조사하기 위해 곡류, 엽채류 및 과채류로 분류하여 각각 조사하였고, 이들 농산물은 모두 재배시 게르마늄 처리를 통해 재배되어 생산된 것이었다.

#### (가) 곡류중의 게르마늄 함량조사

곡류중의 게르마늄 함량조사는 곡류인 벼, 밀 및 보리 등을 대상으로 하여 현재 유통중인 게르마늄 함유 곡류와 관행재배 곡류를 수집하였다. 현재 게르마늄 함유 곡류는 대부분 쌀로서 조사된 게르마늄 함유 쌀은 충남 서산, 경남 진주 및 경남 함양으로 총 5종류의 게르마늄 쌀을 조사하였고, 관행재배 쌀은 경상남도 산청의 총 2종류에서 게르마늄 함량을 조사하였다.

#### (나) 엽채류중의 게르마늄 함량조사

엽채류중의 게르마늄 함량조사는 채소 중 잎을 식용으로 하는 채소를 대상으로 하여 현재 유통중인 게르마늄 함유 엽채류와 관행재배 엽채류를 수집하였다. 현재 게르마늄 함유 엽채류는 게르마늄 미나리 (경남 의령군) 및 게르마늄 대파 (경기도 화성시)로 총 2종류의 게르마늄 함량을 조사하였고, 관행재배 엽채류는 상추 (경상남도 진주시) 및 양배추 (경상남도 진주시)로 총 2종류의 게르마늄 함량을 조사하였다.

#### (다) 과채류중의 게르마늄 함량조사

과채류중의 게르마늄 함량조사는 채소와 과일 중 열매를 식용으로 하는 채소와 과일을 대상으로 하여 현재 유통중인 게르마늄 함유 과채류와 관행재배 과채류를 수집하였다. 현재 게르마늄 함유 과채류는 게르마늄 사과 (충청북도 충주시), 게르마늄 배 (전라남도 나주시), 게르마늄 꽃감 (경상북도 상주시), 게르마늄 참외 (경상북도 상주시), 게르마늄 자두 (경기도 용인시), 게르마늄 귤 (제주도 오라 2동) 및 게르마늄 고추 (경기도 화성시)로 총 7종류의 게르마늄 함량을 조사하였고, 관행재배 과채류는 사과 (경상남도 함양군), 배 (경상남도 진주시), 토마토 (경상남도 진주시), 고추 (경상남도 진주시), 오이 (경상남도 진주시) 및 감자 (경상남도 진주시)로 총 6종류의 게르마늄 함량을 조사하였다.

### (2) 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술 개발

#### (가) 벼의 게르마늄 토양처리시 생육촉진 및 독성발생범위 구명

벼의 게르마늄 토양처리시 생육촉진 및 독성발생범위를 구명하기 위해  $GeO_2$ 의 토양처리농도별 게르마늄 흡수 특성과 게르마늄 종류별 토양처리시 게르마늄 흡수 특성을 각각 조사하였다.

##### ① 게르마늄의 토양처리 농도별 게르마늄 흡수 특성조사

$GeO_2$ 의 토양처리 농도별 게르마늄 흡수 특성조사는 토양의 Ge 함량을 무처리, 1, 2, 4, 8 및  $12 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 하여 게르마늄 토양 처리농도별 벼 생육특성, 게르마늄 토양 처리농도별 토양

중 게르마늄 함량 변화, 게르마늄 토양 처리농도에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량, 게르마늄 토양 처리농도별 쌀 부위별 게르마늄 함량, 게르마늄 토양 처리농도별 쌀 품질 및 식미치 조사를 각각 수행하였다.

우선 벼를 pot에 이양하기 전 토양에  $\text{GeO}_2$ 로 조제한 게르마늄 용액을 이용하여 토양 내 Ge 함량을 무처리, 1, 2, 4, 8 및  $12 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 각각 처리하였다. 토양 중 Ge를 농도별로 처리하는 것은 게르마늄이 극소량 들어가므로 토양과 균일하게 혼합하는 것이 매우 어렵다. 따라서 Ge 농도별 용액을 정확히 pot 토양에 처리하기 위하여 건조된 토양 4 kg을 일정한 용기에 넣고 여기에 germanium oxide ( $\text{GeO}_2$ )를 사용하여 조제한 Ge 용액을 모든 조건에서 동일한 양으로 가한 후 토양과 골고루 혼합 조제하였다. 벼 재배를 시험용기는  $15,000\text{a}^{-1}$  와그너 pot를 사용하였으며, pot당 토양은 4 kg을 채워 넣었다.

$\text{GeO}_2$ 의 토양처리 농도별 각 pot ( $15,000\text{a}^{-1}$ )당 동진벼 5주씩 이양하였으며, 시험구는 6반복 완전임의배치법으로 하였다. 시비는 농업과학기술원 작물별 시비처방 기준에 따라 표준시비량으로  $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O} = 12-3-3 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$  ( $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O} = 0.4-0.10-0.10 \text{ g pot}^{-1}$ )되게 시비하였다. N,  $\text{P}_2\text{O}_5$  및  $\text{K}_2\text{O}$ 의 시비에는 각각 요소, 용과린 및 염화칼리 비료를 사용하였다. 질소와 칼리의 분시비율은 밀거름, 분얼비, 수비 및 실비를 각각 50, 20, 20 및 10%로 하였으며, 관수 및 기타재배는 관행재배법에 준하였다.

## ② 게르마늄 종류별 토양처리시 게르마늄 흡수 특성조사

게르마늄 종류별 토양처리시 게르마늄 흡수 특성조사는 게르마늄 종류를  $\text{GeO}_2$ , Ge-132, Ge 표준용액 및 수도작용 액상게르마늄으로 구분하고, 이들 게르마늄을 이용하여 토양의 Ge 함량을  $4 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 동일하게 처리하여 게르마늄 종류별 벼 생육특성, 게르마늄 종류별 토양 중 게르마늄 함량 변화, 게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량, 게르마늄 종류에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량, 게르마늄 종류별 쌀 품질 및 식미치 조사를 각각 수행하였다. 토양에 게르마늄 처리방법과 시비방법은 상기 ㉠항의  $\text{GeO}_2$ 의 토양처리 농도별 게르마늄 흡수 특성 조사와 동일하게 수행하였다.

### (나) 벼의 게르마늄 엽면살포시 생육촉진 및 독성발생범위 구명

벼의 게르마늄 엽면살포시 생육촉진 및 독성발생범위를 구명하기 위해  $\text{GeO}_2$ 의 엽면처리 농도별 게르마늄 흡수 특성,  $\text{GeO}_2$ 의 엽면처리 횟수별 게르마늄 흡수 특성 및 게르마늄 종류별 엽면처리시 게르마늄 흡수 특성을 각각 조사하였다.



### ① 게르마늄의 엽면처리 농도별 게르마늄 흡수 특성조사

GeO<sub>2</sub>의 엽면처리 농도별 게르마늄 흡수 특성조사는 엽면처리 농도를 무처리, 10, 20, 40 및 80 mg L<sup>-1</sup>로 구분하여 최고분얼기, 수잉기 및 출수기에 각각 50 mL씩 분무기로 분무하여 게르마늄 엽면처리 농도별 벼 생육특성, 게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량, 게르마늄 처리농도에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량, 게르마늄 엽면처리 농도별 쌀 품질 및 식미치 조사를 각각 수행하였다.

우선 벼를 pot에 이양하기 전에 건조된 토양 4 kg을 일정한 용기에 넣고 여기에 모든 조건에서 동일한 양의 수돗물을 가하여 토양과 골고루 혼합 조제하였다. Pot는 1 5,000a<sup>-1</sup> 와그너 pot를 사용하였으며, pot당 토양은 4 kg을 채워 넣었다. GeO<sub>2</sub>의 엽면처리 농도별 각 pot (1 5,000a<sup>-1</sup>)당 동진벼 5주씩 이양하였으며, 시험구는 6반복 완전임의배치법으로 하였다. 시비는 농업과학기술원 작물별 시비처방 기준에 따라 표준시비량으로 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 12-3-3 kg 10a<sup>-1</sup> (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 0.4-0.10-0.10 g pot<sup>-1</sup>)되게 시비하였다. N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 및 K<sub>2</sub>O의 시비에는 각각 요소, 용과린 및 염화칼리 비료를 사용하였다. 질소와 칼리의 분시비율은 밀거름, 분얼비, 수비 및 실비를 각각 50, 20, 20 및 10%로 하였으며, 관수 및 기타재배는 관행재배법에 준하였다. 또한 엽면살포시 주위의 다른 pot에 영향이 미치지 않게 독립적으로 분무하였다.

### ② 게르마늄의 엽면처리 횟수별 게르마늄 흡수 특성조사

GeO<sub>2</sub> 엽면처리 횟수별 게르마늄 흡수 특성조사는 게르마늄 엽면처리 횟수를 1회 (최고분얼기), 2회 (최고분얼기, 수잉기) 및 3회 (최고분얼기, 수잉기, 출수기)로 구분하여 처리하였고, 엽면처리시 Ge 함량은 20 mg L<sup>-1</sup>으로 동일하게 조제하여 각각 1회 50 mL씩 분무기로 분무하여 게르마늄 처리횟수별 벼 생육특성, 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량, 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량, 게르마늄 엽면처리 횟수별 쌀 품질 및 식미치 조사를 각각 수행하였다. 토양에 게르마늄 처리방법과 시비방법은 상기 ①항의 GeO<sub>2</sub>의 엽면처리 농도별 게르마늄 흡수 특성조사와 동일하게 수행하였다.

### ③ 게르마늄 종류별 엽면처리시 게르마늄 흡수 특성조사

게르마늄 종류별 엽면처리시 게르마늄 흡수 특성조사는 게르마늄 종류를 GeO<sub>2</sub>, Ge-132, Ge 표준용액 및 수도작용 액상게르마늄로 구분하고, 엽면처리시 Ge 함량은 20 mg L<sup>-1</sup>으로 동일하게 조제하여 최고분얼기, 수잉기 및 출수기에 각각 50 mL씩 분무기로 분무하여 게르마늄 종류별 벼 생육특성, 게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량, 게르마늄 종류에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량, 게르마늄 종류별 쌀 품질 및 식미치 조사를 각각 수행하였다. 토양에 게르마늄 처리방법과 시비방법은 상기 ④항의 GeO<sub>2</sub>의 엽면처리 농도별 게르마늄 흡수 특성조사와 동일하게 수행하였다.

## 가. 조사시기

벼의 게르마늄 토양처리 및 엽면살포시 생육촉진 및 독성발생범위 구명을 위한 시험연구는 경상남도농업기술원 시설하우스에서 실시하였으며, 벼는 초장 10 cm인 어린모를 2006년 6월 10일 이앙하였다.

벼의 생육조사는 벼 이앙 후 15일 (최고분얼기; 2006년 6월 26일), 벼 이앙 후 30일 (수잉기; 2006년 7월 26일) 및 이앙 후 95일 (출수기; 2006년 9월 12일)에 각 처리 조건별로 실시하였으며, 조사항목은 초장, 분얼수 및 잎수를 각각 조사하였다.

벼의 수확은 벼 이앙 후 106일 (수확; 2006년 10월 25일)에 실시하였으며, 벼 수확 후 생육조사는 각 처리 조건별로 농촌진흥청 농작물 생육조사에 관한 규정에 의해 수장, 간장, 천립중, 등숙률, 총립수, 생체중량, 건조중량 및 수수를 각각 조사하였다.

## 나. 분석방법

토양의 토성분석은 비중계법을 이용하여 토양 무기질 입자 중 모래·미사·점토의 백분율을 산출하여 국제토양학회에서 제작한 삼각도표법을 이용하여 조사하였고, 토양의 화학성분 분석은 농촌진흥청 농업과학기술원의 토양 및 식물체분석법에 준하여 pH는 초자전극법, EC는 EC meter (Orion, Model 160, Germany)로 분석하였으며, 유기물은 Tyurin법, T-N은 Kjeldahl법, 유효인산은 Lancaster법, 유효규산은 NaOAc법, 치환성 양이온은 1N-Ammonium acetate (pH 7.0)침출법으로 각각 분석하였다. 토양 중 게르마늄분석은 가용성 침출액으로 널리 사용되는 0.1N-HCl을 사용하여 30°C에서 1시간 침출하여 여과한 후 Inductively coupled plasma (ICP) spectrometer [Atomscan25 (TJA), OPTIMA 4300DV (Perkin elmer)]를 사용하였다.

식물체 분석을 위한 시료는 열풍건조기로 80°C에서 건조하여 40 mesh 이하로 분쇄한 후 사용하였다. 식물체 분석은 농업과학기술원의 토양 및 식물체분석법에 준하여 시료를 습식분해액으로 분해시킨 여액을 필요에 따라 희석하여 T-N은 Kjeldahl법, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>는 Vanado molybdate법으로 분석하였으며, 무기성분은 Atomic absorption spectrophotometer (AA-SCAN8)로 분석하였으며, 게르마늄은 Inductively coupled plasma (ICP) spectrometer [Atomscan25 (TJA), OPTIMA 4300DV (Perkin elmer)] 및 ICP-MS로 분석하였다.

## 2. 결과 및 고찰

### 가. 유통중인 게르마늄 함유 농산물 중 게르마늄 함량조사

#### (1) 곡류중의 게르마늄 함량조사

곡류중의 게르마늄 함량은 Table 2-3에서 보는 바와 같다. 현재 국내에서 유통중인 게르마늄 함유 곡류는 대부분 쌀이었고, 다른 곡류에는 게르마늄이 아직 시용되지 않은 것으로 조사되었다. 본 연구에서 조사된 게르마늄 함유 쌀의 게르마늄 함량은 전반적으로 0.013-0.072 mg kg<sup>-1</sup>의 범위이었고, 게르마늄이 처리되지 않은 관행재배 쌀의 게르마늄 함량은 전반적으로 0.001-0.002 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 특히, 충청남도 서산에서 생산된 쌀의 게르마늄 함량은 0.072 mg

kg<sup>-1</sup>으로 조사된 다른 게르마늄 함유 쌀에 비해 가장 높았다.

이상의 결과를 미루어볼 때 대부분의 게르마늄 함유 쌀의 게르마늄 함량이 게르마늄이 처리되지 않은 관행재배 쌀의 게르마늄 함량에 비해 약간 높았으며, 일부 품목의 경우 자연함유량과 비슷한 수준을 보여 게르마늄 함량 검정과 게르마늄 함유 쌀 생산을 위한 체계적인 재배기술이 필요할 것으로 판단된다.

Table 2-3. 유통중인 농산물 중 곡류의 게르마늄 함량

Name	Region	Part	Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )
게르마늄 쌀 1	충청남도 서산	쌀	0.013
게르마늄 쌀 2	충청남도 서산	쌀	0.072
게르마늄 쌀 3	충청남도 서산	쌀	0.018
게르마늄 쌀 4	경상남도 진주	쌀	0.057
게르마늄 쌀 5	경상남도 함양	쌀	0.023
관행재배 쌀 1	경상남도 산청	쌀	0.001
관행재배 쌀 2	경상남도 산청	쌀	0.002

#### (2) 엽채류중의 게르마늄 함량조사

엽채류중의 게르마늄 함량은 Table 2-4에서 보는 바와 같다. 현재 국내에서 유통중인 게르마늄 함유 엽채류는 대부분 미나리, 대파 및 상추 등이었다. 본 연구에서 조사된 게르마늄함유 미나리와 대파의 게르마늄 함량은 각각 0.123 및 0.07 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 관행재배에 의한 상추와 양배추의 게르마늄 함량은 전반적으로 0.05-0.06 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 특히, 경상남도 의령군에서 생산된 게르마늄 미나리의 게르마늄 함량은 0.123 mg kg<sup>-1</sup>으로 조사된 다른 게르마늄 함유 엽채류에 비해 가장 높았으며, 경기도 화성시에서 생산된 게르마늄 대파는 관행재배에 의한 상추나 양배추와 비슷한 함량을 보였다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 엽채류의 게르마늄 함량은 엽채류 종류에 따라 다소 차이는 있으나 관행재배 엽채류와 별 차이가 없었으며, 일부 품목의 경우 자연함유량과 비슷한 수준을 보여 엽채류의 게르마늄 함량 검정과 게르마늄 함유 엽채류 생산을 위한 체계적인 재배기술이 필요할 것으로 판단된다. 또한 작물별로 게르마늄 함량차이가 많으므로 게르마늄의 흡수가 용이한 엽채류의 선정도 필요할 것으로 판단된다.

Table 2-4. 유통중인 농산물 중 엽채류의 게르마늄 함량

Name	Region	Part	Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )
게르마늄 미나리	경상남도 의령군	잎	0.123
게르마늄 대파	경기도 화성시	잎	0.070
관행재배 상추	경상남도 진주시	잎	0.060
관행재배 양배추	경상남도 진주시	잎	0.050

### (3) 과채류중의 게르마늄 함량조사

과채류중의 게르마늄 함량은 Table 2-5에서 보는 바와 같다. 현재 국내에서 유통중인 게르마늄 함유 과채류 중 과일류는 사과, 배, 귤, 참외, 자두 및 귤 등으로 많은 과일에 적용이 되었고, 채소류는 고추 등이 있었다. 본 연구에서 조사된 게르마늄 함유 과일류와 채소류의 게르마늄 함량은 각각 0.18-4.78 및 0.07 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 관행재배에 의한 과일류와 채소류의 게르마늄 함량은 각각 0.02-0.04 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 특히, 경상북도 상주시에서 생산된 게르마늄 귤의 게르마늄 함량은 4.78 mg kg<sup>-1</sup>으로 조사된 다른 게르마늄 함유 과채류에 비해 가장 높았으며, 경상북도 상주시에서 생산된 참외와 경기도 화성시에서 생산된 고추의 게르마늄 함량은 0.12 및 0.18 mg kg<sup>-1</sup>으로 조사된 다른 게르마늄 함유 과채류에 비해 가장 낮은 함량을 보였다.

또한 관행재배에 의한 과채류 중 사과의 게르마늄 함량은 0.02-0.04 mg kg<sup>-1</sup>으로 관행재배에 의한 과채류는 작물별로 큰 차이는 없었다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 과채류의 게르마늄 함량은 과채류 종류에 따라 다소 차이는 있으나 관행재배 과채류와 별 차이가 없었으며, 일부 품목의 경우 자연함유량과 비슷한 수준을 보여 과채류의 게르마늄 함량 검정과 게르마늄 함유 과채류 생산을 위한 체계적인 재배기술이 필요할 것으로 판단된다. 또한 작물별로 게르마늄 함량차이가 많으므로 게르마늄의 흡수가 용이한 과채류의 선정도 필요할 것으로 판단된다.

Table 2-5. 유통중인 농산물 중 과채류의 게르마늄 함량

Name	Region	Part	Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )
게르마늄 사과	충청북도 충주시	열매	0.07
게르마늄 배	전라남도 나주시	열매	0.03
게르마늄 꽃감	경상북도 상주시	열매	4.78
게르마늄 참외	경상북도 상주시	열매	0.18
게르마늄 자두	경기도 용인시	열매	1.14
게르마늄 귤	제주도 오라 2동	열매	0.20
게르마늄 고추	경기도 화성시	열매	0.12
관행재배 사과	경상남도 함양군	열매	0.02
관행재배 배	경상남도 진주시	열매	0.02
관행재배 토마토	경상남도 진주시	열매	0.03
관행재배 고추	경상남도 진주시	열매	0.04
관행재배 오이	경상남도 진주시	열매	0.03
관행재배 감자	경상남도 진주시	열매	0.04

나. 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술개발

(1) 벼의 게르마늄 토양처리시 생육촉진 및 독성발생범위 구명

(가) 게르마늄 토양처리 농도별 게르마늄 흡수 특성

GeO<sub>2</sub>의 토양처리 농도별 게르마늄 흡수 특성을 조사하기 위해 토양의 Ge 함량을 무처리, 1, 2, 4, 8 및 12 mg kg<sup>-1</sup>으로 하여 게르마늄 토양처리 농도별 벼 생육특성, 게르마늄 토양처리 농도별 토양 중 게르마늄 함량 변화, 게르마늄 토양처리 농도에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량, 게르마늄 토양처리 농도별 쌀 부위별 게르마늄 함량, 게르마늄 토양처리 농도별 쌀 품질 및 식미치를 조사하였다.

① 게르마늄 토양처리 농도별 벼 생육특성

GeO<sub>2</sub> 토양처리 농도별 벼 생육특성은 Fig. 2-1 및 Table 2-6~2-7에서 보는 바와 같다. 게르마늄 토양처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 초장은 생육초기는 별 차이 없었으나, 생육 30일 후인 수잉기 이후부터 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>이상 처리한 pot에서부터 서서히 벼의 성장이 둔화되기 시작하였다. 특히, 초장은 전반적으로 Ge 0, 1, 2, 4 및 8 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot의 경우 시기별로 다소 차이는 있으나 전반적으로 게르마늄 처리 농도별로 별 차이 없이 비슷한 성장을 보인 반면에 Ge 12 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot의 경우 Ge 0, 1, 2, 4 및 8 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot 비해 초장이 약간 적었다. 이는 게르마늄 처리로 인한 식물의 독성으로 벼의 생육이 억제되었기 때문으로 판단된다.

게르마늄 토양처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 잎수는 Ge 0-4 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot의 경우 전반적으로 생육 전기간 동안 별 차이 없었으며, Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>이상 처리한 pot의 경우 생육초기에는 별 차이 없었으나, 최고분얼기 이후부터 게르마늄 함량이 증가할수록 잎수는 감소되는 경향이였다.

게르마늄 토양처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 분얼수는 최고분얼기에서 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>까지 처리한 pot의 경우 비슷한 경향을 보였으나, Ge 12 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot의 경우 pot당 분얼수가 약간 많았다. 이는 게르마늄 처리로 인한 식물의 독성으로 벼의 유효분얼에 비해 무효분얼이 증가하였기 때문으로 판단된다. 또한 수잉기에서의 분얼수는 Ge 1 mg kg<sup>-1</sup>까지 처리한 pot의 경우 분얼수가 pot당 16-17개 이었으나, Ge 2 mg kg<sup>-1</sup>이상 처리한 pot의 경우 분얼수가 약간 증가하여 pot당 20-22개 이었다. 이와 같이 게르마늄 함량이 증가함에 따라 분얼수가 약간 증가한 것은 게르마늄 토양처리로 인한 식물의 독성으로 무효분얼이 많이 일어나 벼의 불필요한 헛가지가 많이 생긴 것으로 판단된다. 일반적으로 최대분얼기까지 대부분 참가지가 결정되고 그 이후부터 수잉기까지 발생하는 가지들은 무효분얼로 헛가지가 되는 것이 많다.

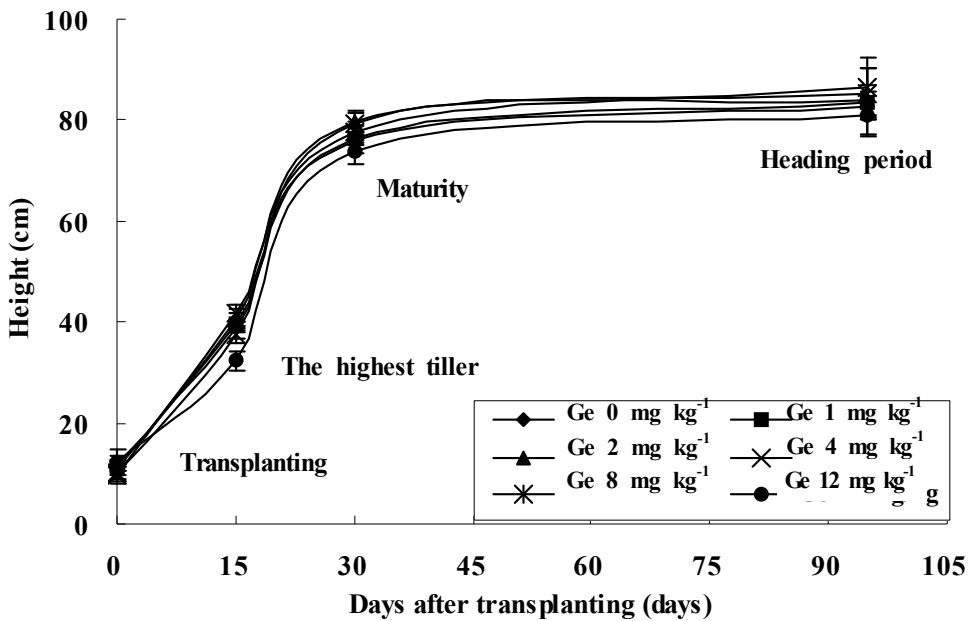


Fig. 2-1. 게르마늄 토양처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 초장 변화.

Table 2-6. 게르마늄 토양처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 잎수 변화

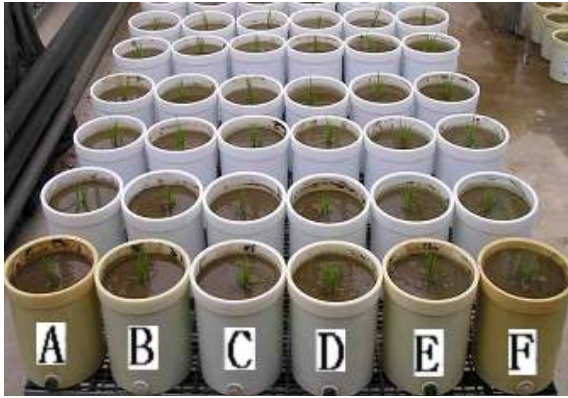
Treatment (mg kg <sup>-1</sup> )	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
	(ca pt <sup>-1</sup> )			
Ge 0	17±0.7	25.0±3.1	58.3±6.1	—
Ge 1	19±0.4	30.2±4.7	55.8±5.9	—
Ge 2	21±1.0	28.2±3.2	61.7±8.8	—
Ge 4	20±0.5	31.8±1.3	58.3±3.8	—
Ge 8	19±1.1	28.5±3.8	52.5±6.6	—
Ge 12	21±0.8	30.7±3.5	50.0±4.5	—

Table 2-7. 게르마늄 토양처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 분얼수 변화

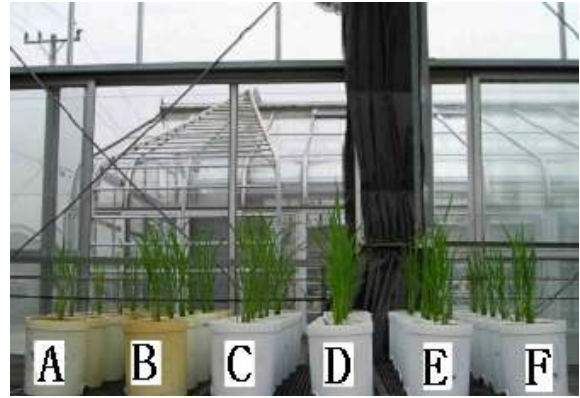
Treatment (mg kg <sup>-1</sup> )	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
	(ca pt <sup>-1</sup> )			
Ge 0	5±0.5	5.17±0.7	16.0±2.0	9.83±1.2
Ge 1	5±0.5	5.17±0.7	16.7±1.1	8.67±0.9
Ge 2	5±0.4	5.17±0.7	21.0±2.8	8.67±0.8
Ge 4	5±0.7	5.17±0.4	21.5±1.4	9.83±0.7
Ge 8	5±0.4	5.17±0.4	20.2±1.0	9.00±0.8
Ge 12	5±0.5	6.00±0.8	21.0±2.7	8.00±1.0

생육저해 이외에 게르마늄의 독성 (phytotoxicity)은 Photo. 2-1에서 보는 바와 같이 처리농도가 증가 할수록 잎에 갈색 반점이 많이 나타났다. 특히, 게르마늄을 12 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리하였을 때는 Photo. 2-2에서 보는 바와 같이 잎에 갈색 반점이 많이 나타났고, 일부 이삭이 검게 변하였다.

벼에서 게르마늄 연구는 과거에 규소의 이동을 연구할 목적으로 사용되었으며, 게르마늄 처리시 식물은 독성을 일으키는데 벼의 경우 생육이 억제되고 황화현상을 일으킨다고 하였다. Ge-Si와 Ge-C 결합은 Si-Si와 Si-C 결합보다 약하기 때문에 세포벽의 정상적인 기능을 손상시키는데 황백화는 이러한 이유에 의해 일어난다고 하였으며, 황백화가 일어나는 식물체 부위에 Ge의 축적이 많았다는 것과 일치한다고 하였다. 게르마늄은 식물체에서 음전하와 결합하는데 세포벽의 acidic residue는 Ge의 binding site로 작용하기도 한다. 식물에서 Ge은 독성이 있는데 벼의 경우 생육이 억제되고 황화현상을 일으킨다고 하였다.



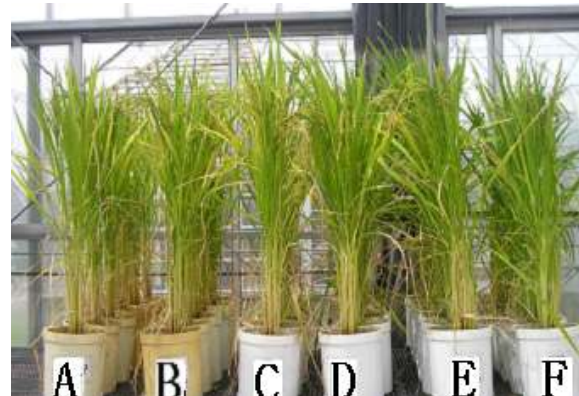
이앙직후



최고분얼기



수잉기



출수기

Photo. 2-1. 게르마늄 토양처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 생육상황.

A : Ge 0 mg kg<sup>-1</sup>, B : Ge 1 mg kg<sup>-1</sup>, C : Ge 2 mg kg<sup>-1</sup>,  
 D : Ge 4 mg kg<sup>-1</sup>, E : Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>, F : Ge 12 mg kg<sup>-1</sup>.



Photo. 2-2. 토양에 Ge 12mg kg<sup>-1</sup> 처리시 벼 잎, 줄기 및 낱알에 나타난 게르마늄 독성.



수확 후 게르마늄의 생육특성은 Table 2-8에서 보는 바와 같이 게르마늄 토양 처리농도가 증가할수록 게르마늄 독성 (phytotoxicity)이 증가하였으며, 독성의 증가로 초장, 수장, 수수 및 천립중이 떨어져 수량이 감소되었다. 게르마늄 8 mg kg<sup>-1</sup> 이상에서 부터 게르마늄 독성이 나타나므로 벼의 정상적인 생육을 위해서는 그 이하의 농도로 게르마늄을 처리하여야 할 것으로 생각된다. 게르마늄 12 mg kg<sup>-1</sup> 처리시 수량은 무처리에 비해 크게 감소하였다.

본 연구자의 선행연구에서 일미벼에서 Ge 2.5 mg kg<sup>-1</sup> 이상에서부터 게르마늄 독성이 나타나기 시작하고, Ge 7.5 mg kg<sup>-1</sup> 처리시 심한 생육저해를 보였으나, 동진벼를 사용한 본 연구에서는 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>까지는 초장의 경우 무처리구와 별 차이가 없었으며, Ge 12 mg kg<sup>-1</sup>부터 게르마늄 독성이 나타나기 시작하였다. 따라서 벼의 품종에 따라 게르마늄의 독성발생범위가 차이가 나는 것으로 판단할 수 있었다.

Table 2-8. 게르마늄 토양 처리농도에 따른 벼의 생육특성

Treatment (mg kg <sup>-1</sup> )	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	No. panicle per hill	No. grain per panicle	1,000 grain (g)	Yield (g pot <sup>-1</sup> )	T/R ratio
Ge 0	60.8±1.4	18.9±1.9	8.8±1.1	97	22.8	15.7	7.57
Ge 1	64.0±2.9	19.6±1.6	8.3±0.9	99	22.9	10.3	4.32
Ge 2	63.9±6.3	19.8±1.1	8.8±0.7	111	23.6	17.1	6.42
Ge 4	65.1±4.6	21.2±1.8	9.3±0.8	106	22.6	14.7	6.75
Ge 8	64.3±4.2	21.1±0.8	8.5±1.0	108	22.4	12.8	4.94
Ge 12	61.3±4.4	19.8±1.3	7.7±0.9	89	22.1	10.1	4.07

## ② 게르마늄 토양처리 농도별 토양 중 게르마늄 및 무기성분 함량 변화

게르마늄 토양 처리농도에 따른 벼 수확 후 토양의 게르마늄 함량은 Fig. 2-2에서 보는 바와 같이 Ge 1, 2, 4, 8 및 12 mg kg<sup>-1</sup>로 처리된 pot에서 벼가 흡수하고 남은 게르마늄 함량은 각각 0.95, 1.84, 3.72, 7.46 및 11.3로 벼가 게르마늄을 흡수한 양은 0.2, 0.64, 1.12, 2.16 및 2.64 mg pot<sup>-1</sup>이었다. 따라서 게르마늄은 전반적으로 토양 내 함량이 증가함에 따라 벼의 게르마늄 흡수량도 증가하였지만 실제 이용되는 게르마늄 함량은 높지 않았다.

벼 수확 후 토양 중 무기성분 함량은 Table 2-9에서 보는 바와 같이 토양 중 T-N 및 SiO<sub>2</sub> 함량은 토양의 게르마늄 처리함량이 증가함에 따라 약간 감소하였으나, 인의 함량은 오히려 약간 증가하는 경향이였다. 게르마늄 처리 농도가 증가 할수록 SiO<sub>2</sub> 함량이 감소되었는데, 이는 토양 내 게르마늄 농도가 증가할수록 Ge-Si 결합이 증가한 것으로 판단된다. 게르마늄 토양 처리농도 증가에 따른 K, Ca 및 Mg의 함량은 게르마늄 토양 처리농도에 따라 다소 차이는 있었으나 전반적으로 별 차이는 없었다.

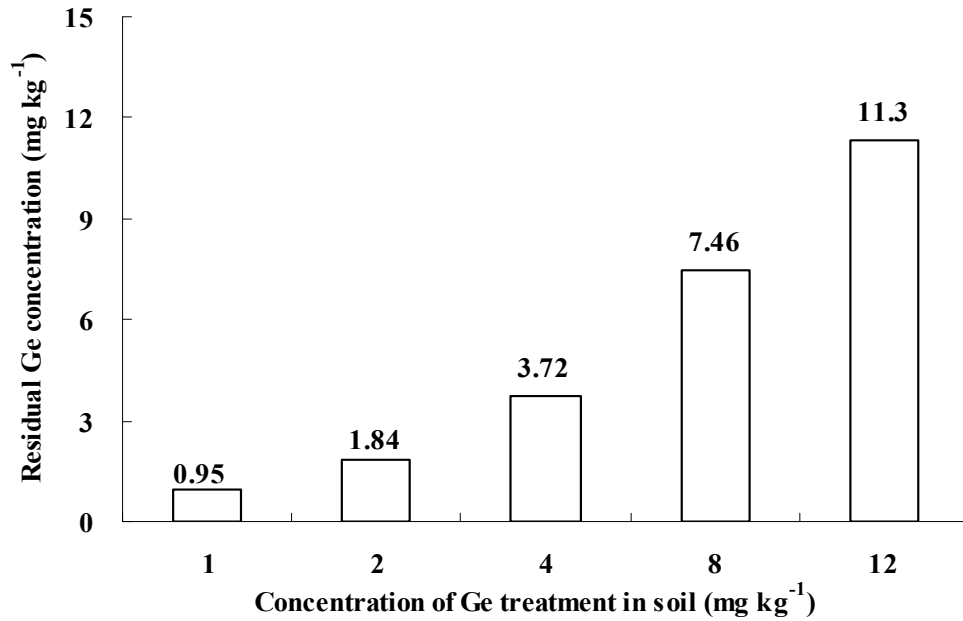


Fig. 2-2. 게르마늄 토양처리 농도에 따른 토양 중 잔류 게르마늄 함량.

Table 2-9. 게르마늄 토양처리 농도에 따른 토양 중 무기성분 함량

Treatment (mg kg <sup>-1</sup> )	T-N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	SiO <sub>2</sub>	Ex.Cat (cmol+ kg <sup>-1</sup> )		
				K	Ca	Mg
Ge 0	989	390	92.4	1.63	4.98	0.89
Ge 1	988	415	81.4	1.80	4.73	0.85
Ge 2	997	488	80.2	1.95	5.16	0.86
Ge 4	901	505	78.8	1.83	4.83	0.87
Ge 8	866	739	76.1	1.80	5.20	0.91
Ge 12	857	790	74.8	2.05	4.90	0.84

### ③ 게르마늄 토양처리 농도에 따른 벼 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

게르마늄 토양처리 농도에 따른 벼 부위별 건물중량 및 게르마늄 함량은 Table 2-10에서 보는 바와 같이 잎, 줄기 및 뿌리로 나누어 조사하였다. 잎, 줄기 및 뿌리의 pot당 건물중량은 게르마늄 함량 증가와 상관없이 유사하였으나, Ge 12 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot의 경우 약간 적었다. 벼 부위별 게르마늄 함량은 잎 및 줄기에서는 게르마늄 토양 처리농도가 증가할수록 게르마늄 함량이 급격히 증가하였으나, 뿌리에서는 게르마늄 토양 처리농도가 증가할수록 게르마늄 함량이 미미하게 증가하였다.

Table 2-10. 게르마늄 토양처리 농도에 따른 벼 부위별 건물중량과 게르마늄 함량

Treatment (mg kg <sup>-1</sup> )	Dry weight (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
Ge 0	5.10	8.40	4.23	2.80	0.75	0.015
Ge 1	5.10	8.40	5.59	18.7	9.01	0.027
Ge 2	5.41	8.92	5.09	49.7	16.9	0.045
Ge 4	5.50	9.08	5.51	98.9	29.2	0.087
Ge 8	5.19	8.56	6.07	184	56.4	0.165
Ge 12	4.75	7.83	5.72	254	87.6	0.215

게르마늄 토양처리 농도에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량 및 게르마늄 흡수율은 Ffig. 2-3에서 보는 바와 같다. 게르마늄 흡수량은 게르마늄 함량에 건물중량을 고려하여 계산하였고, 그 결과 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 잎 > 줄기 >> 뿌리 순이었으며, 특히 Ge 12 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot에서 줄기 및 뿌리의 게르마늄 흡수량은 각각 254, 87.6 및 0.2 mg kg<sup>-1</sup>으로 가장 많은 흡수량을 보였다. 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 전반적으로 잎과 줄기에서 가장 높았고, 뿌리는 잎과 줄기에 비해 아주 낮았다. 게르마늄 흡수율은 게르마늄 토양 처리 함량이 2 mg kg<sup>-1</sup>까지는 게르마늄 함량이 증가 할수록 점점 증가 하였고, 게르마늄 토양 처리 함량이 2 mg kg<sup>-1</sup>에서 게르마늄 흡수율이 5.25%로 가장 높았다. 그러나 게르마늄 흡수율은 게르마늄 처리 함량이 2 mg kg<sup>-1</sup>이상부터는 점점 감소하는 경향으로 Ge 12 mg kg<sup>-1</sup> 처리에서 3.94%로서 가장 낮았다.

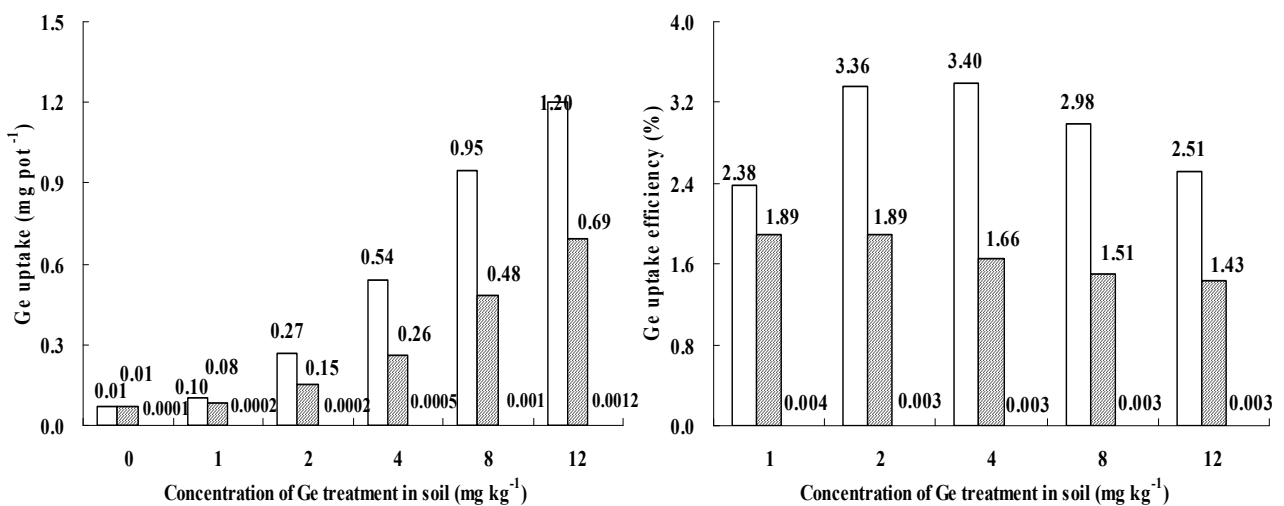


Fig. 2-3. 게르마늄 토양처리 농도에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량 및 흡수율.

□ : Leaf, ▨ : Stem, ▩ : Root.

④ 게르마늄 토양처리 농도에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량

게르마늄 토양처리 농도에 따른 쌀 부위별 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-11에서 보는 바와 같이 쌀겨, 현미 및 백미로 나누어 조사하였다. 쌀겨, 현미 및 백미의 pot당 생산량은 게르마늄 함량 증가와 상관없이 유사하였으나, Ge 12 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot의 경우 약간 적었다. 쌀겨에서는 게르마늄 토양처리 농도가 증가 할수록 게르마늄 함량이 급격히 증가하였으나, 현미 및 백미에서는 게르마늄 토양처리 농도가 증가 할수록 게르마늄 함량이 미미하게 증가하였다. 특히 게르마늄은 쌀의 껍질에 많이 분포되는 것으로 보이며, 쌀겨와 쌀눈 등이 포함된 현미의 게르마늄 함량이 백미에 비해 높았다. 따라서 쌀을 이용하여 게르마늄을 섭취하려면 되도록 도정공정을 줄인 현미가 좋을 것으로 판단된다.

Table 2-11. 게르마늄 토양처리 농도에 따른 쌀 부위별 생산량과 게르마늄 함량

Treatment (mg kg <sup>-1</sup> )	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
Ge 0	2.87	12.9	12.7	0.06	0.002	0.001
Ge 1	1.87	8.43	8.31	3.90	1.82	0.71
Ge 2	3.11	14.0	13.8	58.0	1.97	1.00
Ge 4	2.67	12.0	11.9	106	3.05	1.48
Ge 8	2.33	10.5	10.3	293	6.15	3.14
Ge 12	1.83	8.26	8.15	359	10.2	5.55

게르마늄 토양처리 농도에 따른 쌀 부위별 게르마늄 흡수량 및 게르마늄 흡수율은 Fig. 2-4에서 보는 바와 같다. 게르마늄 흡수량은 게르마늄 함량에 생산량을 고려하여 계산하였고, 그 결과 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 쌀겨 ≫ 현미 > 백미 순이었으며, 특히 Ge 12 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot에서 현미 및 백미의 게르마늄 흡수량은 각각 0.08 및 0.05 mg kg<sup>-1</sup>으로 가장 많은 흡수량을 보였다. 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 전반적으로 쌀겨에서 가장 높았고, 현미와 백미는 쌀겨에 비해 약간 낮았다. 게르마늄 흡수율은 게르마늄 처리 함량이 2 mg kg<sup>-1</sup>까지는 게르마늄 함량이 증가 할수록 점점 증가하였고, 게르마늄 처리 함량이 2 mg kg<sup>-1</sup>에서 게르마늄 흡수율이 2.7%로 가장 높았다. 그러나 게르마늄 흡수율은 게르마늄 처리 함량이 2 mg kg<sup>-1</sup>이상부터는 점점 감소하는 경향이였다.

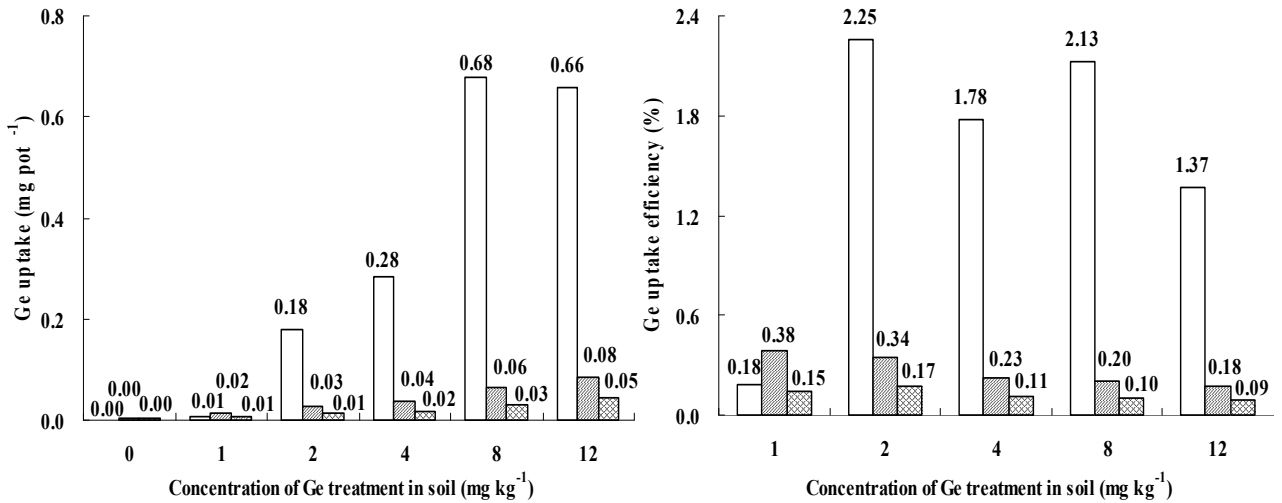


Fig. 2-4. 게르마늄 토양 처리농도에 따른 쌀 부위별 게르마늄 흡수량 및 흡수율.

□ : Rice bran, ▨ : Brown rice, ▩ : Polished rice.

⑤ 게르마늄 토양 처리농도별 쌀 품질 및 식미치

게르마늄 토양 처리농도별 쌀 품질 및 식미치 특징을 조사한 결과 Table 2-12에서 보는 바와 같이 전반적으로 별 차이 없이 비슷한 경향이였다. 단백질 함량은 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot에서 9.9%로 가장 높았고, Amylose 함량은 Ge 12 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot에서 24.3%로 가장 높았다. 또한 알칼리 붕괴도는 Ge 2 및 8 mg kg<sup>-1</sup>에서 가장 좋았고, 모든 처리농도의 호화온도는 전반적으로 낮았으며, 쌀의 심복백은 모든 처리농도에서 거의 없었다. 쌀 중 질소의 함량은 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>에서 1.71%로 가장 높았고, 쌀 중 인 및 마그네슘의 함량은 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>에서 86.4 및 55.4 eq로 가장 높았다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 토양처리 농도별 쌀 품질 및 식미치는 토양처리 농도에 따라 별 차이 없었다.

Table 2-12. 토양처리 농도별 쌀 품질 및 식미치

Treatment (mg kg <sup>-1</sup> )	WhiteCore & Velly (0-9)	Alkiline degree (1-7)	Gelatinization temperature Low/High	Amylose Contents	Protein Contents	N	P	Mg
				----- (%) -----				
Ge 0	0/1	4	Low	21.6	9.3	1.63	81.3	44.6
Ge 1	0/1	3	Low	22.4	9.5	1.58	82.5	47.8
Ge 2	0/1	5	Low	22.9	9.1	1.60	79.2	48.1
Ge 4	0/1	4	Low	22.2	8.6	1.65	82.7	47.0
Ge 8	0/1	5	Low	23.8	9.9	1.71	86.4	52.3
Ge 12	0/1	4	Low	24.3	9.3	1.64	81.4	55.4

(나) 게르마늄 종류별 토양처리시 게르마늄 흡수 특성

게르마늄 종류별 토양처리시 게르마늄 흡수 특성을 조사하기 위해 토양의 게르마늄 종류를  $\text{GeO}_2$ , Ge-132, Ge 표준용액 및 수도작용 액상게르마늄으로 구분하고, 이들 게르마늄을 이용하여 토양의 Ge 함량을  $4 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 동일하게 처리하여 게르마늄 종류별 벼 생육특성, 게르마늄 종류별 토양 중 게르마늄 함량 변화, 게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량, 게르마늄 종류에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량, 게르마늄 종류별 쌀 품질 및 식미치 조사를 각각 수행하였다.

① 게르마늄 종류별 토양처리시 벼 생육특성

게르마늄 종류별 토양처리시 벼 생육특성은 Fig. 2-5 및 Table 2-13~2-14에서 보는 바와 같다. 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육시기별 초장은  $\text{GeO}_2$ , Ge-132 및 Ge 표준용액의 경우 생육시기에 따라 별 차이 없이 비슷한 성장상을 보였다. 하지만 수도작용 액상게르마늄으로 동일한 게르마늄 함량인  $4 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 처리시 다른 게르마늄에 비해 생육기간 동안 생육이 약간 저조하였다.

게르마늄 종류에 따른 토양처리시 벼의 생육시기별 잎수는 초장과 비슷한 경향으로  $\text{GeO}_2$ , Ge-132 및 Ge 표준용액의 경우 생육시기에 따라 별 차이 없이 비슷하였으나, 수도작용 액상게르마늄은 다른 게르마늄에 비해 생육기간 동안 잎수가 약간 적었다.

게르마늄 종류에 따른 토양처리시 벼의 생육시기별 분얼수는  $\text{GeO}_2$ , Ge-132 및 Ge 표준용액의 경우 생육시기에 따라 별 차이 없이 비슷하였으나, 수도작용 액상게르마늄은 다른 게르마늄에 비해 생육기간 동안 분얼수가 약간 적었다. 특히 수도작용 액상게르마늄은 수잉기에서 분얼수가 다른 게르마늄에 비해 적었는데, 이는 수도작용 액상게르마늄은 게르마늄 이외에 미량무기성분들로 인해 무효분얼이 적게 일어난 것으로 판단된다.

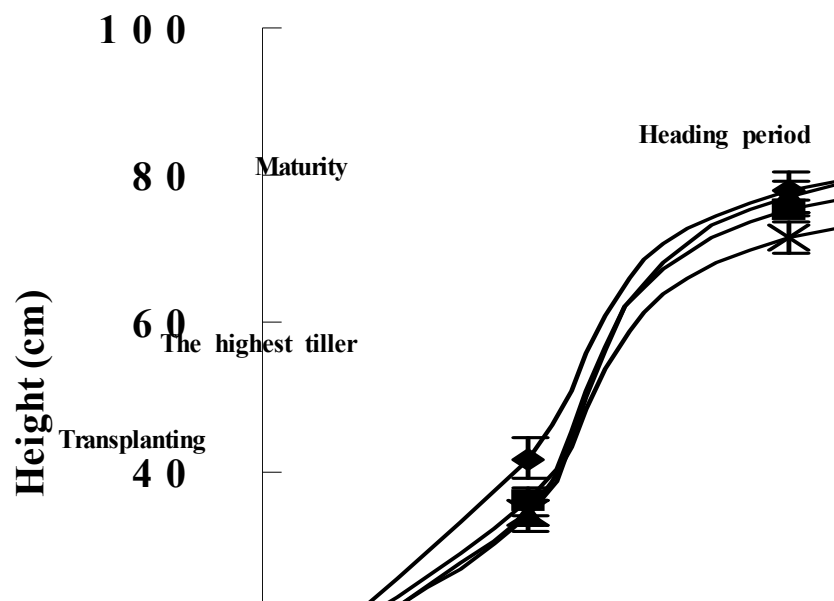


fig. 2-5. 게르마늄 종류에 따른 토양처리시 벼의 생육시기별 초장변화.

Table 2-13. 게르마늄 종류에 따른 토양처리시 벼의 생육시기별 잎수 변화

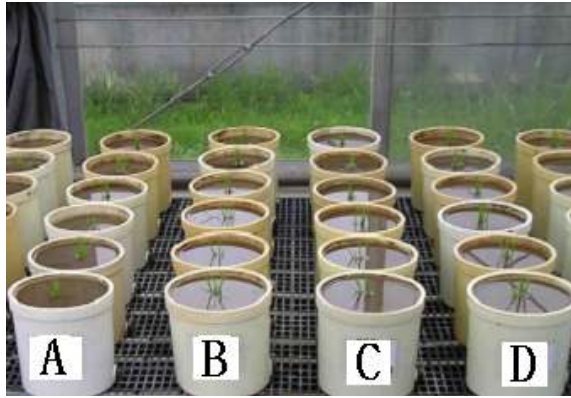
Treatment	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
GeO <sub>2</sub>	20±0.5	31.8±1.3	58.3±3.8	—
Ge-132	17±0.7	26.8±2.7	64.3±5.0	—
Ge standard solution	19±0.4	28.7±6.5	58.8±8.7	—
Ge material	21±0.8	26.0±1.6	49.8±3.3	—

Table 2-14. 게르마늄 종류에 따른 토양처리시 벼의 생육시기별 분얼수 변화

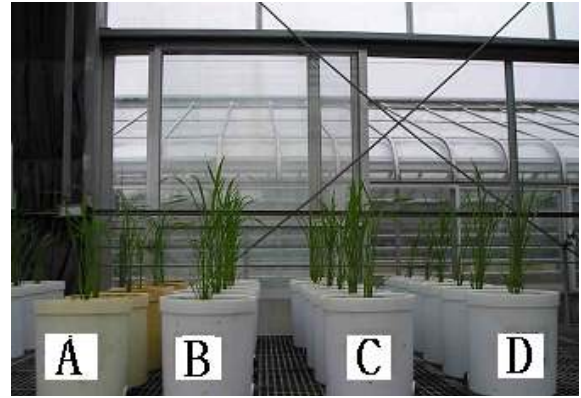
Treatment	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
GeO <sub>2</sub>	5±0.7	5.17±0.4	21.5±1.4	9.8±0.7
Ge-132	5±0.4	5.17±0.4	22.3±2.6	11.2±1.5
Ge standard solution	5±0.5	5.50±1.0	23.0±3.7	10.3±0.9
Ge material	5±0.6	5.17±0.4	18.5±2.4	10.5±0.8

게르마늄 종류에 따른 토양처리시 생육시기별 생육상황은 Photo. 2-3에서 보는 바와 같이 모든 처리구에서 게르마늄 독성이 나타나지 않았다. 따라서 게르마늄 종류에 상관없이 Ge 4 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리된 pot에서는 게르마늄 독성이 벼에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었으며, 상기 게르마늄 토양 처리농도별 게르마늄 흡수특성 결과에서 8 mg kg<sup>-1</sup>부터 독성이 나타나기 시작한 결과와 일치하였다.

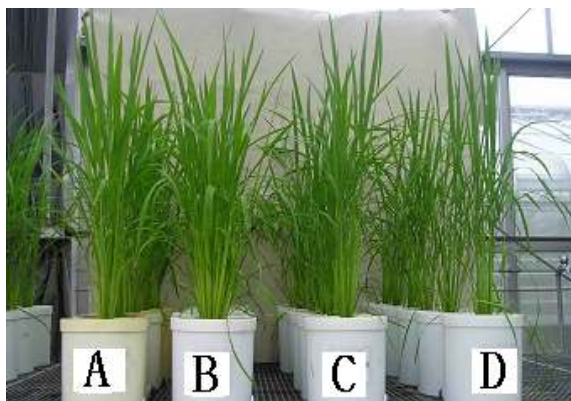
수확후 게르마늄의 종류별 토양처리시 생육특성은 Table 2-15에서 보는 바와 같이 GeO<sub>2</sub>, Ge-132 및 Ge 표준용액의 경우 생육시기에 따라 별 차이 없이 비슷하였으나, 수도작용 액상게르마늄은 다른 게르마늄에 비해 초장, 수장, 수수 및 천립중이 떨어져 수량이 감소되었다. 이는 수도작용 액상게르마늄은 게르마늄의 흡수를 용이하게 조제되었기 때문에 동일함량에서도 벼의 독성 증가로 수량이 감소된 것으로 판단된다. 따라서 수도작용 액상게르마늄은 다른 게르마늄에 비해 함량을 줄여 사용해야 할 것으로 판단된다.



이앙직후



최고분얼기



수잉기



출수기

Photo. 2-3. 게르마늄 종류에 따른 토양처리시 벼의 생육시기별 생육상황.

A :  $\text{GeO}_2$  ( $4 \text{ mg kg}^{-1}$ ),

B :  $\text{Ge-132}$  ( $4 \text{ mg kg}^{-1}$ ),

C : Ge standard solution ( $4 \text{ mg kg}^{-1}$ ), D : Commercial Ge ( $4 \text{ mg kg}^{-1}$ ).



Table 2-15. 게르마늄 종류에 따른 토양처리시 벼의 생육특성

Treatment (mg kg <sup>-1</sup> )	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	No. panicle per hill	No. grain per panicle	1,000 grain (g)	Yield (g pot <sup>-1</sup> )	T/R ratio
GeO <sub>2</sub>	65.1±4.6	21.2±1.8	9.3±0.8	106	22.6	14.7	6.75
Ge-132	66.5±4.1	19.0±1.3	10.2±1.6	79	22.7	15.5	6.87
Ge standard solution	66.8±3.6	19.3±0.6	8.2±1.1	104	22.4	16.1	7.02
Ge material	46.7±1.8	18.7±1.4	9.2±1.5	87	21.6	11.4	5.66

② 게르마늄 종류별 토양처리시 토양 중 게르마늄 및 무기성분 함량 변화

게르마늄 종류에 따른 토양처리시 벼 수확 후 토양의 게르마늄 함량은 Fig. 2-6에서 보는 바와 같이 GeO<sub>2</sub>, Ge-132, Ge 표준용액 및 수도작용 액상게르마늄으로 각각 Ge 4 mg kg<sup>-1</sup>로 토양에 동일하게 처리했을 때 토양 중 잔류 게르마늄 함량은 각각 3.72, 3.81, 3.73 및 3.77 mg kg<sup>-1</sup>로 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이 비슷한 경향이였다.

벼 수확 후 토양 중 무기성분 함량은 Table 2-16에서 보는 바와 같이 전반적으로 게르마늄 종류에 따라 무기성분 함량은 별 차이 없었다. 하지만 GeO<sub>2</sub>를 사용한 경우 토양 중 T-N 함량이 다른 게르마늄에 비해 약간 낮았고, SiO<sub>2</sub> 함량은 다른 게르마늄에 비해 약간 높았다.

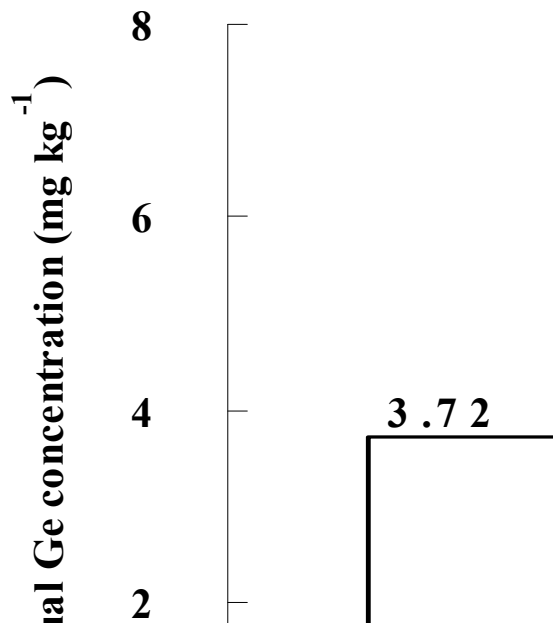


Fig. 2-6. 게르마늄 종류에 따른 토양처리시 토양 중 잔류 게르마늄 함량.

Table 2-16. 게르마늄 종류에 따른 토양처리시 토양 중 무기성분 함량

Treatment	T-N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Ex.Cat (cmol+ kg <sup>-1</sup> )		
	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----			K	Ca	Mg
GeO <sub>2</sub>	901.3	505.9	78.8	1.83	4.83	0.87
Ge-132	987.4	519.5	74.9	1.87	5.16	0.96
Ge standard solution	975.2	515.8	67.4	1.90	4.89	1.00
Ge material	978.4	521.4	66.8	2.10	4.76	0.87

③ 게르마늄 종류에 따른 토양처리시 벼 부위별 게르마늄 흡수량

게르마늄 종류에 따른 토양처리시 벼 부위별 건물중량 및 게르마늄 함량은 Table 2-17에서 보는 바와 같이 잎, 줄기 및 뿌리로 나누어 조사하였다. 벼 부위별 건물중량은 잎, 줄기 및 뿌리가 각각 5.38-5.73, 8.87-9.44 및 4.56-5.51 g pot<sup>-1</sup>의 범위로 게르마늄 종류와 상관없이 유사하였다. 벼 부위별 게르마늄 함량은 잎의 경우 Ge 표준용액과 수도작용 액상게르마늄이 다른 게르마늄에 비해 높은 함량을 보였으나, 뿌리의 경우 상대적으로 잎과 줄기에 비해 게르마늄 함량이 매우 낮았다. 줄기의 게르마늄 함량은 Ge-132를 제외한 게르마늄들은 비슷한 함량을 보였으나, Ge-132는 다른 게르마늄에 비해 약간 낮은 함량을 보였다. 전반적으로 Ge-132의 경우 잎, 줄기 및 뿌리에서 게르마늄 함량은 다른 게르마늄에 비해 약간 낮았는데 이는 유기게르마늄이라 식물에 의한 흡수 및 이동이 다른 게르마늄에 비해 용이하지 않았기 때문으로 사료된다.

Table 2-17. 게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 함량

Treatment	Dry weight (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
GeO <sub>2</sub>	5.50	9.08	5.51	98.9	29.2	0.087
Ge-132	5.73	9.44	4.75	93.7	10.6	0.091
Ge standard solution	5.38	8.87	4.56	113.9	32.8	0.084
Ge material	5.38	8.87	4.85	103.6	28.3	0.079

게르마늄 종류에 따른 토양처리시 벼 부위별 게르마늄 흡수량 및 게르마늄 흡수율은 fig. 2-7에서 보는 바와 같다. 게르마늄 흡수량은 게르마늄 함량에 건물중량을 고려하여 계산하였고, 그 결과 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 잎 > 줄기 ≫ 뿌리 순이었으며, GeO<sub>2</sub>, Ge 표준용액 및 수도작용 액상게르마늄은 비슷한 게르마늄 흡수량을 보인 반면 Ge-132는 다

른 게르마늄에 비해 흡수량이 약간 낮은 경향이였다. 특히 Ge 표준용액으로 처리한 pot에서의 게르마늄 흡수량은 잎 및 줄기에서 0.6 및 0.3 mg pot<sup>-1</sup>로 다른 게르마늄에 비해 가장 많은 흡수량을 보였다.

벼 부위별 게르마늄 흡수율은 전반적으로 잎과 줄기에서 가장 높았고, 뿌리는 잎과 줄기에 비해 아주 낮았다. 게르마늄 흡수율은 잎의 경우 Ge 표준용액이 3.8%로 가장 높았으며, Ge-132가 3.4%로 가장 낮았고, 줄기의 경우 Ge 표준용액이 1.8%로 가장 높았으며, Ge-132가 0.6%로 가장 낮았다. 또한 뿌리의 게르마늄 흡수율은 게르마늄 종류에 상관없이 매우 낮았다. 이는 흡수된 게르마늄이 대부분 잎이나 줄기로 이동하기 때문으로 사료된다.

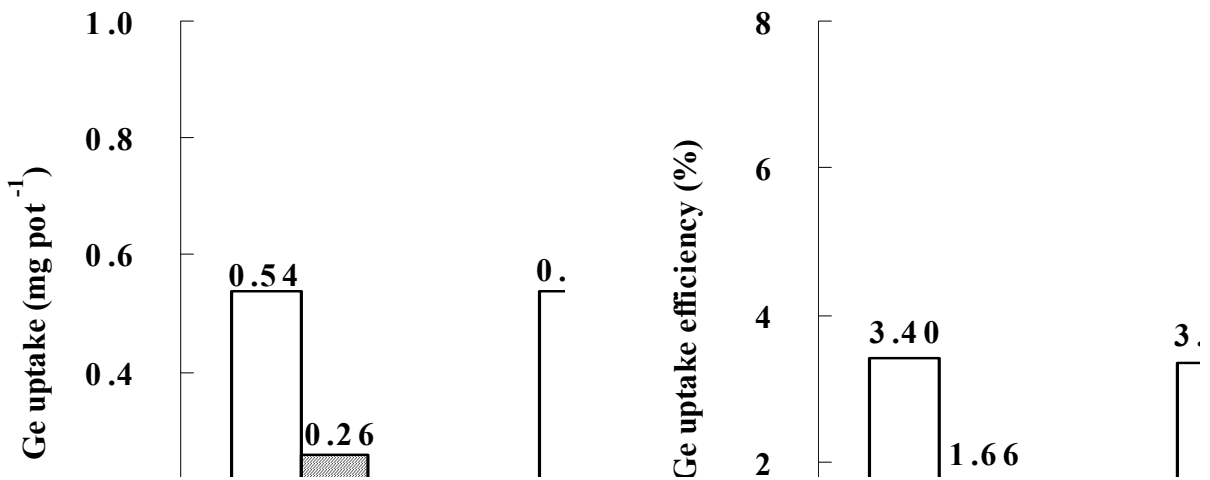


fig. 2-7. 게르마늄 종류에 따른 토양처리시 벼 부위별 게르마늄 흡수량 및 흡수율.

□ : Leaf, ▨ : Stem, ▩ : Root.

#### ④ 게르마늄 종류에 따른 토양처리시 쌀 부위별 게르마늄 함량

게르마늄 종류에 따른 토양처리시 쌀 부위별 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-18에서 보는 바와 같이 쌀겨, 현미 및 백미로 나누어 조사하였다. 쌀 부위별 생산량은 쌀겨, 현미 및 백미가 각각 2.1-2.9, 9.3-13.2 및 9.2-13.0 g pot<sup>-1</sup>의 범위이었으며, GeO<sub>2</sub>, Ge-132 및 Ge 표준용액의 경우 생산량이 별 차이 없었으나, 수도작용 액상게르마늄의 경우 다른 게르마늄 처리에 비해 생산량이 약간 적었다. 이는 상기 게르마늄 종류에 따른 생육상황과 일치하는 결과로 게르마늄 독성으로 인한 벼의 생육저해 때문인 것으로 판단된다.

쌀 부위별 게르마늄 함량을 조사한 결과 쌀겨에서는 GeO<sub>2</sub>가 다른 게르마늄 처리에 비해 매우 높은 함량을 보였고, 현미는 GeO<sub>2</sub>, Ge 표준용액 및 수도작용 액상게르마늄 처리에서 비슷한 함량을 보인 반면 Ge-132 처리에서는 다른 게르마늄 처리에 비해 낮은 게르마늄 함량을 보였다. 백미도 현미와 비슷한 경향으로 Ge-132 처리에서 다른 게르마늄 처리에 비해 낮은 게르마늄 함량을 보였다. 이는 Ge-132의 경우 유기게르마늄이기 때문에 식물에 의한 흡수 및 이동이 다른 무기게르마늄에 비해 용이하지 않기 때문으로 사료된다.

특히 게르마늄은 쌀의 껍질에 많이 분포되는 것으로 보이며, 쌀겨와 쌀눈 등이 포함된 현미의 게르마늄 함량이 백미에 비해 높았다. 따라서 쌀을 이용하여 게르마늄을 섭취 하려면 되도록 도정공정을 줄인 현미가 좋을 것으로 판단된다.

Table 3-18. 게르마늄 종류에 따른 토양처리시 쌀 부위별 게르마늄 함량

Treatment	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
GeO <sub>2</sub>	2.67	12.0	11.9	106	3.05	1.48
Ge-132	2.82	12.7	12.5	33.4	0.79	0.55
Ge standard solution	2.92	13.2	12.9	45.8	3.41	1.93
Commercial Ge	2.07	9.33	9.20	30.2	3.40	0.64

게르마늄 종류에 따른 쌀 부위별 게르마늄 흡수량 및 게르마늄 흡수율은 fig. 2-8에서 보는 바와 같다. 게르마늄 흡수량은 게르마늄함량에 생산량을 고려하여 계산하였고, 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 쌀겨 > 현미 > 백미 순이었으며, GeO<sub>2</sub>, Ge 표준용액은 다른 게르마늄 처리에 비해 흡수량이 약간 높은 경향이였다. 특히 GeO<sub>2</sub>로 처리한 pot에서의 게르마늄 흡수량은 쌀겨에서 0.28 mg pot<sup>-1</sup>로 다른 게르마늄에 비해 가장 많은 흡수량을 보였다.

며 부위별 게르마늄 흡수율은 전반적으로 쌀겨 > 현미 > 백미 순으로 쌀겨에서 가장 높았다. 게르마늄 흡수율은 쌀겨의 경우 GeO<sub>2</sub>가 1.8%로 가장 높았으며, Ge-132와 수도작용 액상 게르마늄이 가장 낮았다. 현미와 백미의 게르마늄 흡수율은 GeO<sub>2</sub>와 Ge 표준용액이 다른 게르마늄 처리에 비해 가장 높았다. 따라서 게르마늄이 뿌리로부터 낱알까지 쉽게 이행하기 위해서는 게르마늄의 종류가 GeO<sub>2</sub> 및 Ge 표준용액을 사용해야 할 것으로 판단된다.

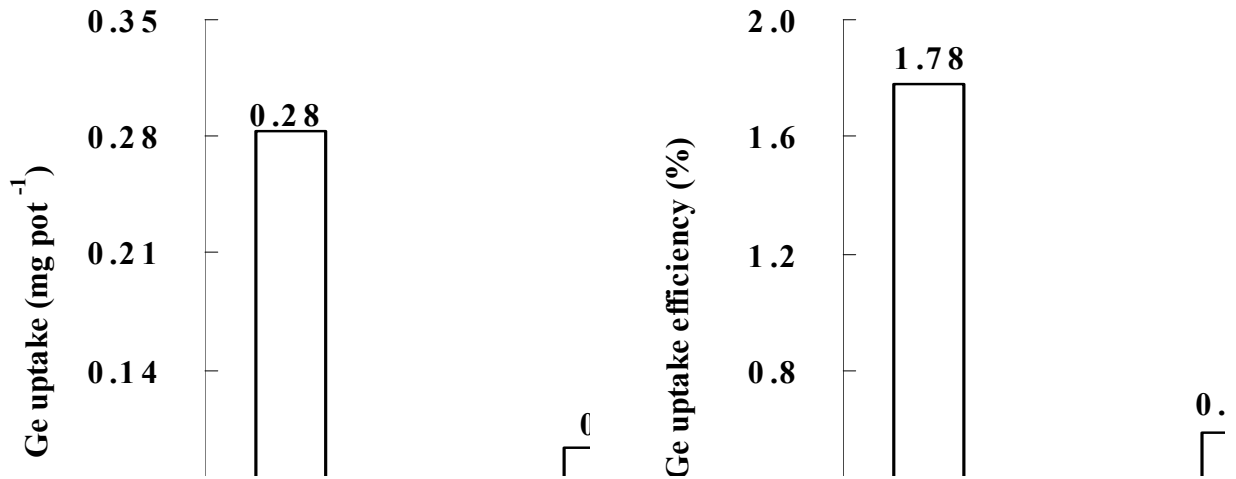


fig. 2-8. 게르마늄 종류별 토양처리시 쌀 부위별 게르마늄 흡수량 및 흡수율.

□ : Rice bran, ▨ : Brown rice, ▩ : Polished rice.

#### ⑤ 게르마늄 토양 처리농도별 쌀 품질 및 식미치

게르마늄 토양 처리농도별 쌀 품질 및 식미치 특징을 조사한 결과 Table 2-19에서 보는 바와 같이 전반적으로 별 차이 없이 비슷한 경향이였다. 단백질 함량은 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot에서 9.9%로 가장 높았고, Amylose 함량은 Ge 12 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot에서 24.3%로 가장 높았다. 또한 알칼리 붕괴도는 Ge 2 및 8 mg kg<sup>-1</sup>에서 가장 좋았고, 모든 처리농도의 호화온도는 전반적으로 낮았으며, 쌀의 심복백은 모든 처리농도에서 거의 없었다. 쌀 중 질소의 함량은 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>에서 1.71%로 가장 높았고, 쌀 중 인 및 마그네슘의 함량은 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>에서 86.4 및 55.4 eq로 가장 높았다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 게르마늄 토양 처리농도별 쌀 품질 및 식미치는 토양처리 농도에 따라 별 차이 없었다.

Table 2-19. 게르마늄 토양처리 농도별 쌀 품질 및 식미치

Treatment (mg kg <sup>-1</sup> )	WhiteCore & Velly (0-9)	Alkiline degree (1-7)	Gelatinization temperature Low/High	Amylose	Protein	N	P	Mg
				Contents	Contents			
				-----(%)-----		---(eq)---		
Ge 0	0/1	4	Low	21.6	9.3	1.63	81.3	44.6
Ge 1	0/1	3	Low	22.4	9.5	1.58	82.5	47.8
Ge 2	0/1	5	Low	22.9	9.1	1.60	79.2	48.1
Ge 4	0/1	4	Low	22.2	8.6	1.65	82.7	47.0
Ge 8	0/1	5	Low	23.8	9.9	1.71	86.4	52.3
Ge 12	0/1	4	Low	24.3	9.3	1.64	81.4	55.4

(2) 벼 생육시기별 게르마늄 엽면살포시 생육촉진 및 독성발생범위 구명

(가) 게르마늄 엽면처리 농도별 게르마늄 흡수 특성

GeO<sub>2</sub>의 엽면처리 농도별 게르마늄 흡수 특성을 조사하기 위해 엽면처리 농도를 무처리, 10, 20, 40 및 80 mg L<sup>-1</sup>로 구분하여 최고분얼기, 수잉기 및 출수기에 각각 50 mL씩 분무기로 분무하여 게르마늄 엽면처리 농도별 벼 생육특성, 게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량, 게르마늄 엽면처리 농도에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량, 게르마늄 엽면처리 농도별 쌀 품질 및 식미치를 조사하였다.

① 게르마늄 엽면처리 농도별 벼 생육 특성

GeO<sub>2</sub> 엽면처리 농도별 벼 생육특성은 Fig. 2-9 및 Table 2-20~2-21에서 보는 바와 같다. 게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 초장은 생육 전시기 동안 GeO<sub>2</sub> 엽면처리 농도에 따라 별 차이 없이 서로 비슷한 성장을 보이는 것을 알 수 있었다. 또한 게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 잎수도 초장과 비슷한 경향으로 GeO<sub>2</sub> 엽면처리 농도에 따라 별 차이 없이 비슷한 경향이였다.

게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 분얼수는 생육초기에는 전반적으로 게르마늄 처리에 따라 별 차이 없이 비슷한 분얼을 보였으나, 수잉기에서 Ge 40 mg L<sup>-1</sup>까지 처리한 pot의 경우 분얼수가 pot당 17.5-18.5 ea pot<sup>-1</sup>이었으나, Ge 80 mg L<sup>-1</sup>으로 처리한 pot의 경우 분얼수가 pot당 20.0 ea으로 다른 처리농도에 비해 약간 증가하였다. 이와 같이 수잉기에서 게르마늄 함량이 증가함에 따라 분얼수가 약간 증가한 것은 게르마늄 처리로 인한 식물의 독성으로 무효분얼이 많이 일어나 벼의 불필요한 헛가지가 많이 생긴 것으로 판단된다.

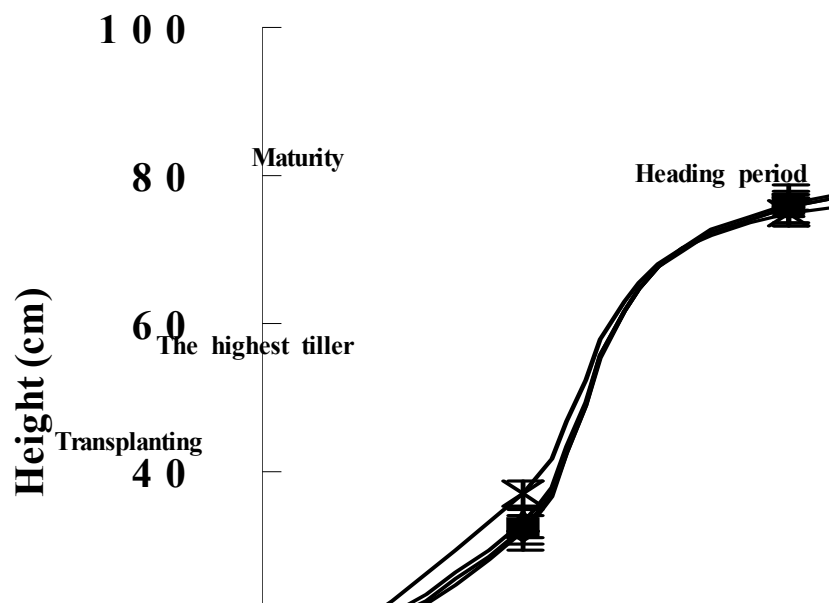


Fig. 2-9. 게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 초장 변화.

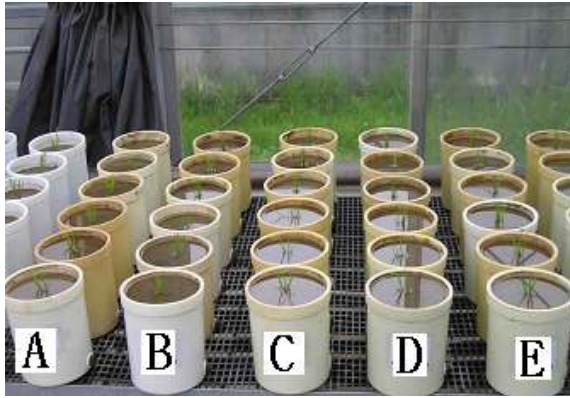
Table 2-20. 게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 잎수 변화

Treatment (mg L <sup>-1</sup> )	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
	(ea pot <sup>-1</sup> )			
Ge 10	17±0.9	25.2±2.6	60.0±10.7	—
Ge 20	19±0.4	24.8±2.3	60.0± 4.3	—
Ge 40	21±0.8	23.7±1.6	61.5± 3.5	—
Ge 80	20±0.5	26.2±5.3	63.0± 8.0	—

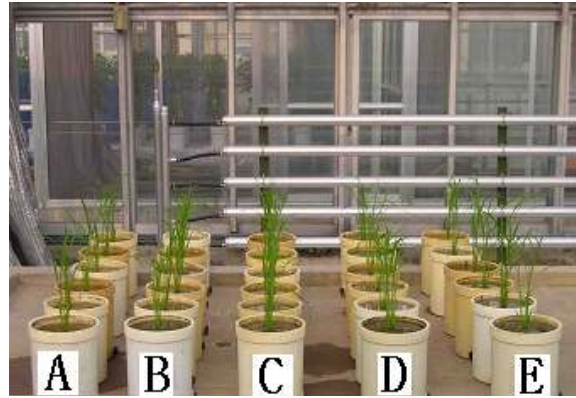
Table 2-21. 게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 분얼수 변화

Treatment (mg L <sup>-1</sup> )	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
	(ea pot <sup>-1</sup> )			
Ge 10	5±0.4	5.83±0.4	17.50±3.9	10.83±1.1
Ge 20	5±0.7	5.73±0.4	18.83±1.6	9.67±1.1
Ge 40	5±0.5	5.92±0.4	18.50±2.4	8.17±1.2
Ge 80	5±0.6	6.00±1.0	20.00±1.6	10.00±1.2

게르마늄 엽면처리농도에 따른 생육시기별 생육상황은 Photo. 2-4에서 보는 바와 같이 모든 처리구에서 게르마늄 독성은 나타나지 않았다. 따라서 게르마늄 엽면 처리농도 80 mg L<sup>-1</sup>까지는 게르마늄 독성이 벼에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.



이양직후



최고분얼기



수잉기



출수기

Photo. 2-4. 게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 생육상황.

A : Ge 0 mg L<sup>-1</sup>, B : Ge 10 mg L<sup>-1</sup>, C : Ge 20 mg L<sup>-1</sup>,  
 D : Ge 40 mg L<sup>-1</sup>, E : Ge 80 mg L<sup>-1</sup>.

수확후 게르마늄의 생육특성은 Table 2-22에서 보는 바와 같이 게르마늄 엽면처리 농도가 증가할수록 초장, 수장, 수수, 친립중 및 생산량이 점점 감소되는 경향이였다. 특히 쌀의 생산량은 Ge 10 mg L<sup>-1</sup>처리에서 10.7 g pot<sup>-1</sup>인 것이 Ge 80 mg L<sup>-1</sup>처리에서 9.0 g pot<sup>-1</sup>으로 감소하였다. 이는 상기 생육상황조사에서 육안으로는 게르마늄의 독성이 관찰되지 않았지만 벼 생육기간동안 게르마늄이 점점 영향을 미치는 것으로 판단된다.



Table 2-22. 게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼의 생육특성

Treatment (mg L <sup>-1</sup> )	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	No. panicle per hill	No. grain per panicle	1,000 grain (g)	Yield (g pot <sup>-1</sup> )	T/R ratio
Ge 10	55.2±1.9	19.2±0.9	9.7±0.5	81	20.7	10.7	4.88
Ge 20	58.0±2.0	18.9±1.0	9.0±0.6	83	21.6	11.1	4.42
Ge 40	58.5±0.8	18.9±0.7	8.0±1.2	99	21.0	9.6	4.47
Ge 80	55.7±1.1	18.5±1.0	8.3±1.1	88	20.3	9.0	4.16

② 게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼 부위별 게르마늄 함량

게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼 부위별 건물중량 및 게르마늄 함량은 Table 2-23에서 보는 바와 같이 잎, 줄기 및 뿌리로 나누어 조사하였다. 잎, 줄기 및 뿌리의 pot당 건물중량은 게르마늄 엽면처리 농도에 따라 별 차이 없었다. 벼 부위별 게르마늄 함량은 잎 및 줄기에서는 게르마늄 엽면처리 농도가 증가할수록 게르마늄 함량이 급격히 증가하였으나, 뿌리에서는 게르마늄 엽면처리 농도가 증가할수록 게르마늄 함량이 미미하게 증가하였다. 이와 같이 뿌리에서 게르마늄 함량이 미미하게 증가하는 것은 엽면살포 후 일부가 포트내로 떨어져 흡수되기 때문으로 사료된다.

Table 2-23. 게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼 부위별 건물중량과 게르마늄 함량

Treatment (mg L <sup>-1</sup> )	Dry weight (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
Ge 10	5.44	8.98	5.90	10.4	5.40	0.022
Ge 20	5.47	9.03	5.95	20.2	12.6	0.037
Ge 40	5.22	8.61	5.33	56.8	36.4	0.069
Ge 80	5.95	9.80	6.42	116	55.3	0.097

게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼 부위별 흡수량 및 게르마늄 흡수율은 fig. 2-10에서 보는 바와 같다. 게르마늄 흡수량은 게르마늄 함량에 건물중량을 고려하여 계산하였고, 그 결과 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 줄기와 잎은 비슷하였고, 상대적으로 뿌리는 매우 적은 흡수량을 보였다. 특히 10-40 mg L<sup>-1</sup>으로 처리한 pot에는 줄기가 잎에 비해 미미하지만 약간 높은 게르마늄 흡수량을 보였고, Ge 80 mg L<sup>-1</sup>으로 처리한 pot에는 잎이 줄기에 비해 약간 높은 흡수량을 보였다. 하지만 본 실험에서 수행한 엽면처리 농도에서는 게르마늄 독성이 발생되지 않았기 때문에 차후에 더 높은 게르마늄 농도로 엽면처리하여 독성발생범위를 조사해야 할 것으로 판단된다.

벼 부위별 게르마늄 흡수율은 전반적으로 잎과 줄기가 뿌리에 비해 매우 높았고, 상대적으로 뿌리는 아주 낮았다. 게르마늄 흡수율은 게르마늄 함량이 증가 할수록 점점 증가 하였고, Ge 80 mg L<sup>-1</sup>에서 게르마늄 흡수율은 잎과 줄기가 각각 5.7 및 4.5%로 가장 높았다. 따라서 엽면 시비의 경우 게르마늄 엽면처리 농도가 증가 할수록 게르마늄 흡수율이 증가함을 알 수 있었다.

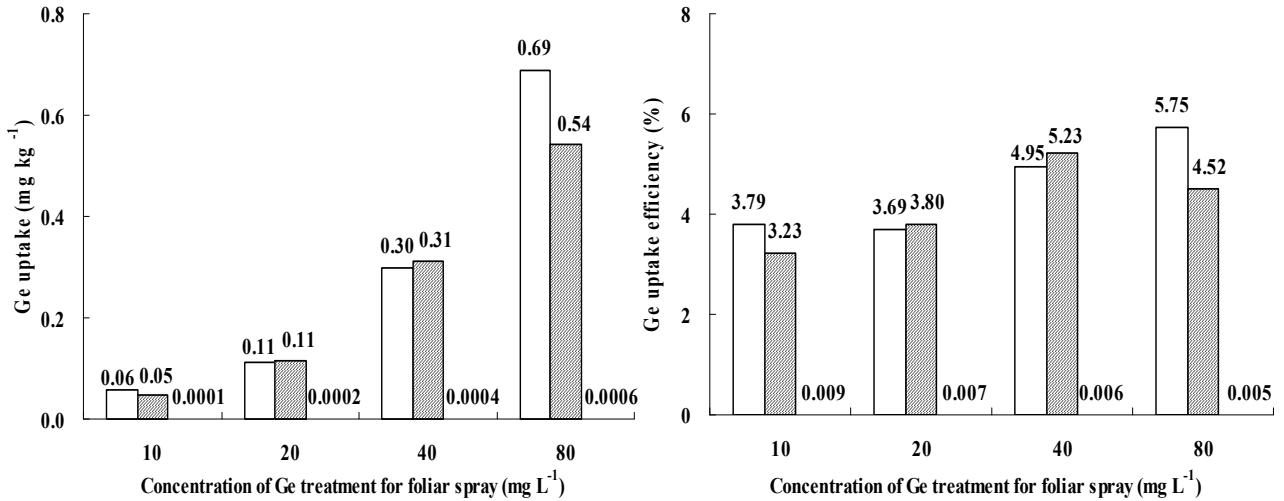


Fig. 2-10. 게르마늄 엽면처리 농도에 따른 벼 부위별 흡수량 및 흡수율.

□ : Leaf, ▨ : Stem, ▩ : Root.

### ③ 게르마늄 엽면처리 농도별 쌀 부위별 게르마늄 함량

게르마늄 엽면처리 농도에 따른 쌀 부위별 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-24에서 보는 바와 같다. 쌀겨, 현미 및 백미의 pot당 생산량은 게르마늄 함량 증가와 상관없이 유사하였으나, Ge 80 mg L<sup>-1</sup>으로 처리한 pot의 경우 약간 적었다. 쌀겨에서는 게르마늄 엽면처리 농도가 증가 할수록 게르마늄 함량이 급격히 증가 하였으나, 현미 및 백미에서는 게르마늄 엽면처리 농도가 증가 할수록 게르마늄 함량이 미미하게 증가 하였다. 특히 게르마늄은 쌀의 껍질에 많이 분포되는 것으로 보이며, 쌀겨와 쌀눈 등이 포함된 현미의 게르마늄 함량이 백미에 비해 높았다. 따라서 쌀을 이용하여 게르마늄을 섭취하려면 되도록 도정공정을 줄인 현미가 좋을 것으로 판단된다.

Table 2-24. 게르마늄 엽면 처리농도에 따른 쌀 부위별 생산량과 게르마늄 함량

Treatment (mg L <sup>-1</sup> )	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
Ge 10	1.94	8.75	8.63	3.07	1.34	1.18
Ge 20	2.02	9.08	8.96	57.8	1.73	1.59
Ge 40	1.74	7.85	7.75	96.3	2.96	2.19
Ge 80	1.63	7.36	7.26	129	5.63	3.80

게르마늄 엽면처리 농도에 따른 쌀 부위별 게르마늄 흡수량과 및 게르마늄 흡수율은 fig. 2-11에서 보는 바와 같다. 게르마늄 흡수량은 게르마늄함량에 생산량을 고려하여 계산하였고, 그 결과 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 쌀겨 > 현미 > 백미 순이었으며, 특히 Ge 80 mg L<sup>-1</sup>으로 처리한 pot에서 현미 및 백미의 게르마늄 흡수량은 각각 0.04 및 0.03 mg pot<sup>-1</sup>으로 가장 많은 흡수량을 보였다. 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 전반적으로 쌀겨에서 가장 높았고, 현미와 백미는 쌀겨에 비해 약간 낮았다. 게르마늄 흡수율은 게르마늄 처리 함량이 Ge 20 mg L<sup>-1</sup>까지는 게르마늄 함량이 증가할수록 점점 증가하여 Ge 20 mg L<sup>-1</sup>에서 게르마늄 흡수율이 4.88%로 가장 높았다. 그러나 게르마늄 흡수율은 Ge 20 mg L<sup>-1</sup>이상부터는 점점 감소하는 경향이였다.

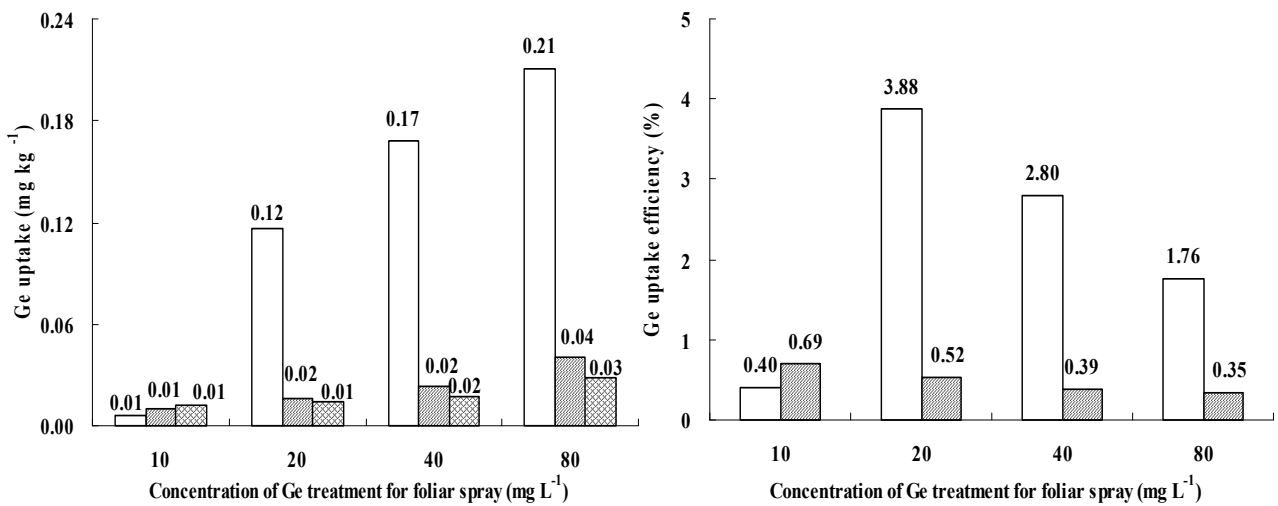


fig. 2-11. 게르마늄 엽면처리 농도에 따른 쌀 부위별 게르마늄 흡수량 및 흡수율.

□ : Rice bran, ▨ : Brown rice, ▩ : Polished rice.

#### ④ 게르마늄 엽면 처리농도별 쌀 품질 및 식미치

게르마늄 엽면 처리농도별 쌀 품질 및 식미치 특징을 조사한 결과 Table 2-25에서 보는 바와 같이 전반적으로 별 차이 없이 비슷한 경향이였다. 단백질 함량은 Ge 4 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리

한 pot에서 10.3%로 가장 높았고, Amylose 함량은 Ge 4 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot에서 25.9%로 가장 높았다. 또한 알칼리 붕괴도는 Ge 4 및 12 mg kg<sup>-1</sup>에서 가장 좋았고, 모든 처리농도의 호화온도는 전반적으로 낮았으며, 쌀의 심복백은 모든 처리농도에서 거의 없었다. 쌀 중 질소의 함량은 Ge 4 mg kg<sup>-1</sup>에서 1.72%로 가장 높았고, 인 및 마그네슘의 함량은 Ge 4 mg kg<sup>-1</sup>에서 101.4 및 68.3 eq로 가장 높았다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 게르마늄 엽면 처리농도별 쌀 품질 및 식미치는 Ge 4 mg kg<sup>-1</sup> 처리시 약간 좋은 미질을 보였으나, 전반적으로 엽면 처리 농도에 따라 별 차이 없었다.

Table 2-25. 게르마늄 엽면 처리농도별 쌀 품질 및 식미치

Treatment (mg kg <sup>-1</sup> )	WhiteCore & Velly (0-9)	Alkiline degree (1-7)	Gelatinization temperature Low/High	Amylose Contents -----	Protein Contents (%)-----	N	P	Mg
								---(eq)---
Ge 0	0/1	4	Low	22.7	9.2	1.64	92.5	55.7
Ge 1	0/1	4	Low	22.1	9.6	1.58	96.7	61.4
Ge 2	0/1	3	Low	23.4	8.7	1.67	99.3	59.8
Ge 4	0/1	5	Low	25.9	10.3	1.72	101.4	68.3
Ge 8	0/1	4	Low	24.2	9.8	1.70	94.4	62.1
Ge 12	0/1	5	Low	23.8	9.5	1.63	95.6	65.8

(나) 게르마늄 엽면처리 횟수별 게르마늄 흡수 특성

GeO<sub>2</sub>의 엽면처리 횟수별 게르마늄 흡수 특성을 조사하기 위해 게르마늄 엽면처리 횟수를 1회 (최고분얼기), 2회 (최고분얼기, 수잉기), 3회 (최고분얼기, 수잉기, 출수기)로 구분하여 처리하였고, 엽면처리시 Ge 함량은 20 mg L<sup>-1</sup>으로 동일하게 조제하여 각각 1회 50 mL씩 분무기로 분무하여 게르마늄 엽면처리 횟수별 벼 생육특성, 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량, 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량, 게르마늄 엽면처리 횟수별 쌀 품질 및 식미치를 조사하였다.

① 게르마늄 엽면처리 횟수별 벼 생육 특성

GeO<sub>2</sub>의 엽면처리 횟수별 벼 생육특성은 Fig. 2-12 및 Table 2-26~2-27에서 보는 바와 같다. 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 벼의 생육시기별 초장은 생육 전시기 동안 엽면처리 횟수에 따라 별 차이 없이 서로 비슷한 성장을 보이는 것을 알 수 있었다. GeO<sub>2</sub>의 엽면처리 횟수에 따른 벼의 생육시기별 잎수는 전반적으로 처리횟수에 따라 별 차이는 없었으나, 최고분얼기와 출수기에 엽면살포 한 2회와 3회 처리의 경우에 잎수가 약간 적어지는 경향이였다. 또한 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 벼의 생육시기별 분얼수도 초장과 비슷한 경향으로 엽면처리 횟수에 따라 별 차이 없이 비슷한 경향이였다.

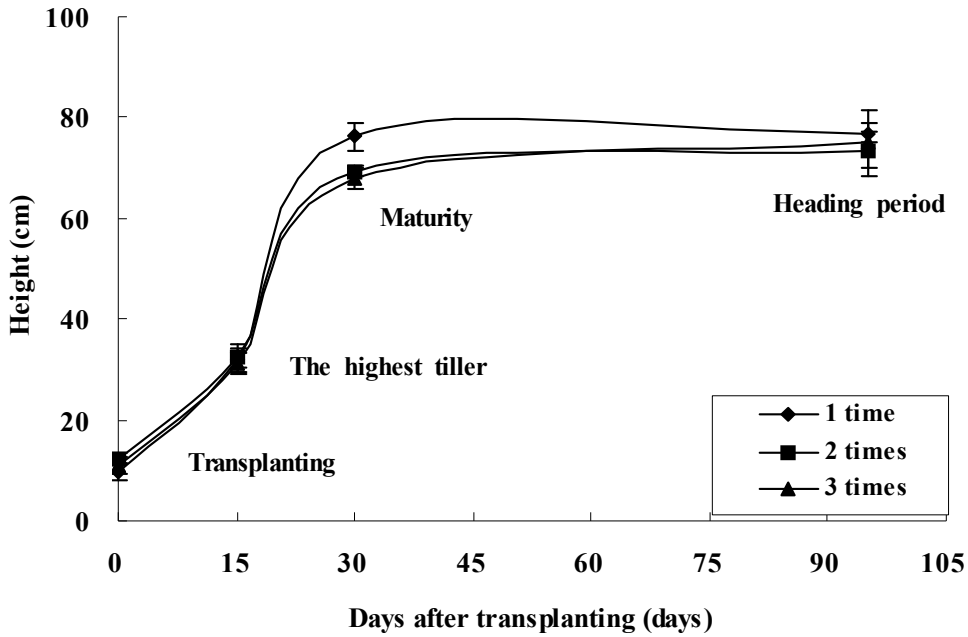


Fig. 2-12. 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 벼 생육시기별 초장변화.

Table 2-26. 게르마늄 엽면 처리횟수에 따른 벼의 생육시기별 잎수 변화

Treatment times	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
	(ea pot <sup>-1</sup> )			
1	17.0±0.7	26.2±2.7	61.0±5.1	—
2	20.0±0.5	22.5±2.3	56.0±6.2	—
3	19.0±0.4	24.8±2.3	60.0±4.3	—

1: 최고분얼기, 2: 최고분얼기+수잉기, 3: 최고분얼기+수잉기+출수기.

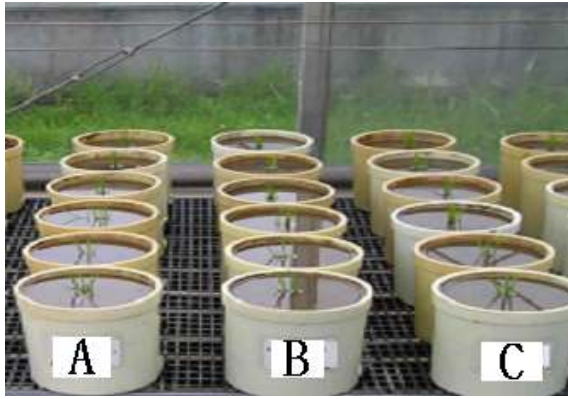
Table 2-27. 게르마늄 엽면 처리횟수에 따른 벼의 생육시기별 분얼수 변화

Treatment times	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
	(ea pot <sup>-1</sup> )			
1	6.0±0.5	6.2±0.4	19.7±2.4	10.5±1.4
2	5.0±0.5	5.8±0.4	17.0±2.9	9.3±0.8
3	5.0±0.7	5.7±0.4	18.8±1.6	9.7±1.1

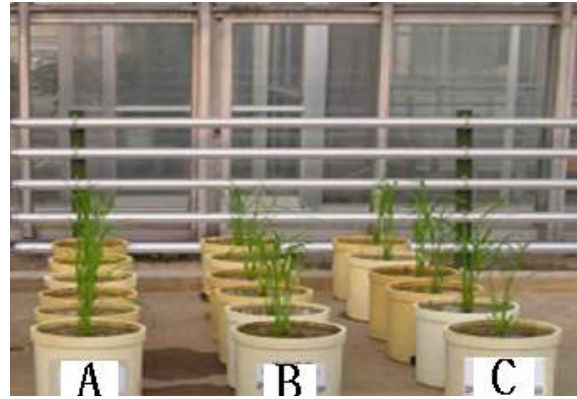
1: 최고분얼기, 2: 최고분얼기+수잉기, 3: 최고분얼기+수잉기+출수기.

게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 생육시기별 생육상황은 Photo. 2-5에서 보는 바와 같이 모든 처리구에서 게르마늄 독성은 나타나지 않았다. 따라서 게르마늄 엽면 처리농도 20 mg L<sup>-1</sup> 을 처리횟수 3회까지 엽면처리하는 것은 게르마늄 독성이 벼에 영향을 미치지 않는 것으로 판

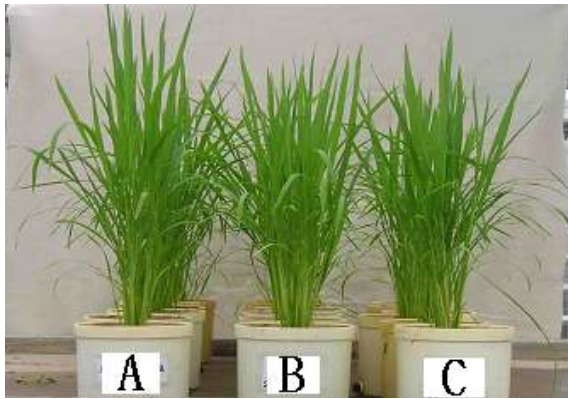
단되었다.



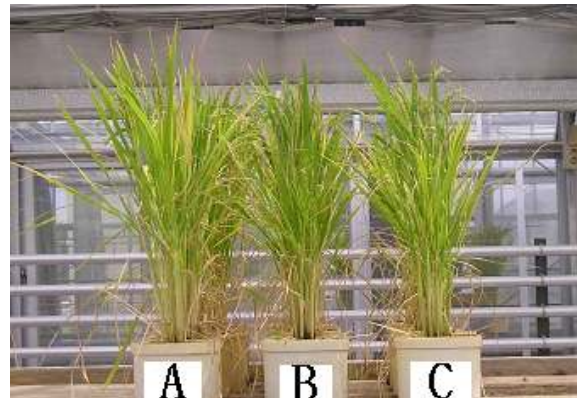
이양직후



최고분얼기



수잉기



출수기

Photo. 2-5. 게르마늄 엽면 처리횟수에 따른 생육시기별 생육상황.

- A : 1회 처리 (최고분얼기),
- B : 2회 처리 (최고분얼기+수잉기),
- C : 3회 처리 (최고분얼기+수잉기+출수기).

수확후 게르마늄의 엽면처리 횟수에 따른 생육특성은 Table 2-28에서 보는 바와 같이 게르마늄 엽면처리 횟수에 따라 초장, 수장, 수수, 천립중 및 생산량은 처리에 따라 다소 차이는 있었으나, 전반적으로 별 차이 없었고, 쌀의 생산량은 엽면처리 횟수와 상관없이  $9.2-11.1 \text{ g pot}^{-1}$  이었다. 특히 천립중의 경우  $21.6-21.7 \text{ g}$ 으로 거의 일치하는 결과를 보여 게르마늄의 엽면처리 횟수는 벼의 생육에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Table 2-28. 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 생육상황

Treatment times	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	No. panicle per hill	No. grain per panicle	1,000 grain (g)	Yield (g pot <sup>-1</sup> )	T/R ratio
1	55.0±3.7	18.6±1.1	9.3±0.8	77	21.73	10.4	4.61
2	56.4±1.3	18.6±1.1	8.8±0.7	73	21.71	9.2	4.56
3	58.0±2.0	18.9±1.0	9.0±0.6	83	21.60	11.1	4.42

1: 최고분얼기, 2: 최고분얼기+수잉기, 3: 최고분얼기+수잉기+출수기.

② 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 벼 부위별 게르마늄 함량

게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 벼 부위별 건물중량 및 게르마늄 함량은 Table 2-29에서 보는 바와 같이 잎, 줄기 및 뿌리로 나누어 조사하였다. 잎, 줄기 및 뿌리의 pot당 건물중량은 잎과 줄기에서는 게르마늄 엽면처리 횟수에 따라 별 차이 없었으나, 뿌리에서는 게르마늄 엽면처리 횟수 2회와 3회의 경우 1회에 비해 적었다. 이와 같이 게르마늄 엽면처리 횟수 2회와 3회에서 건물중량이 적은 것은 최고분얼기 및 수잉기에 게르마늄을 처리하여 게르마늄이 뿌리의 생육을 저해하였기 때문으로 판단된다. 벼 부위별 게르마늄 함량은 잎 및 뿌리에서는 별 다른 경향이 없이 비슷하였고, 줄기에서는 게르마늄 엽면처리 횟수가 증가할수록 게르마늄 함량이 높아지는 경향이 있었다.

Table 2-29. 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 벼 부위별 게르마늄 함량

Treatment times	Dry weight (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
1	5.35	8.82	7.56	23.5	3.74	0.012
2	4.94	8.14	4.90	35.8	6.25	0.017
3	5.47	9.03	5.95	20.2	12.6	0.037

1: 최고분얼기, 2: 최고분얼기+수잉기, 3: 최고분얼기+수잉기+출수기.

게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 벼 부위별 흡수량 및 게르마늄 효율은 Fig. 2-13에서 보는 바와 같다. 게르마늄 흡수량은 게르마늄함량에 건물중량을 고려하여 계산하였고, 그 결과 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 잎 > 줄기 ≫ 뿌리 순으로 잎과 뿌리의 경우 처리횟수에 상관없이 비슷한 경향을 보인 반면 줄기의 경우 게르마늄 엽면처리 횟수가 증가함에 따라 게르마늄 흡수량도 증가하였다. 따라서 벼의 줄기의 경우 게르마늄 엽면처리 횟수와 상관이 있는 것으로 판단되며, 잎은 게르마늄 엽면처리 횟수와 상관없는 것으로 판단된다.

벼 부위별 게르마늄 흡수율은 전반적으로 잎과 줄기가 뿌리에 비해 매우 높았고, 상대적으로

뿌리는 아주 낮았다. 잎의 게르마늄 흡수율은 게르마늄 엽면처리 횟수가 증가할수록 약간 감소하는 경향이였다. 엽면살포시 게르마늄 엽면처리 농도가 증가할수록 게르마늄 흡수율이 증가하였으나 게르마늄 엽면처리 횟수의 경우 처리횟수가 증가할수록 오히려 약간 감소하였다.

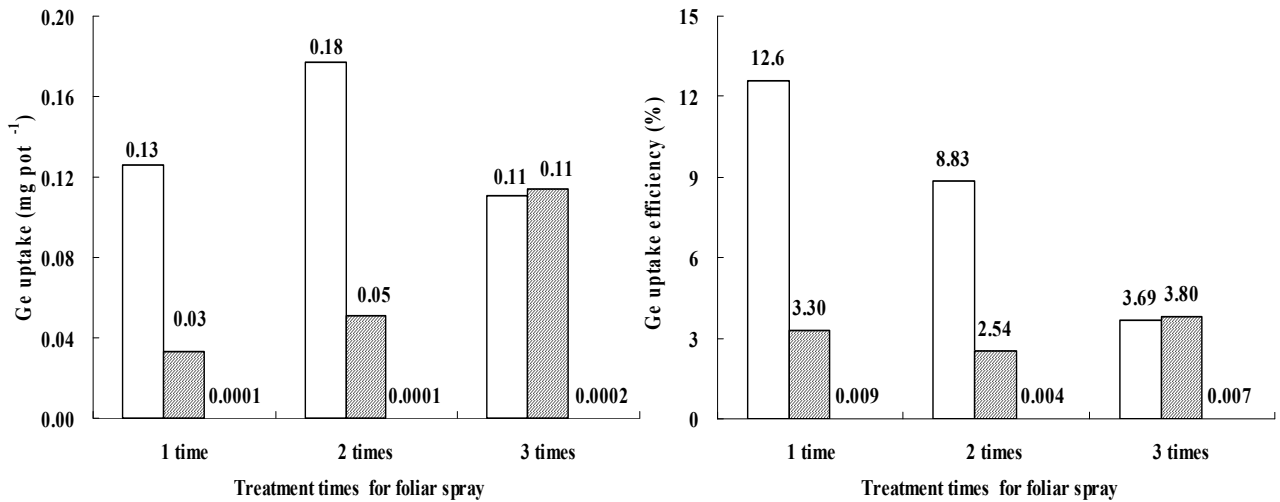


fig. 2-13. 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 벼 부위별 흡수량 및 흡수율.

□ : Leaf, ▨ : Stem, ▩ : Root.

### ③ 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량

게르마늄 엽면 처리횟수에 따른 쌀 부위별 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-30에서 보는 바와 같다. 쌀겨, 현미 및 백미의 pot당 생산량은 게르마늄 엽면처리 횟수가 증가함에 따라 미미하게 증가하는 경향이였다. 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 게르마늄함량은 전반적으로 쌀겨 >> 현미 > 백미 순이었다. 게르마늄 함량은 쌀겨의 경우 게르마늄 엽면처리 횟수가 증가할수록 게르마늄 함량이 급격히 증가하였으나, 현미 및 백미에서는 게르마늄 엽면처리 횟수가 증가할수록 게르마늄 함량이 미미하게 증가하였다. 따라서 쌀의 게르마늄 함량을 증가시키기 위해서는 게르마늄 엽면처리 횟수를 늘려야 할 것으로 판단된다. 특히 게르마늄은 쌀의 껍질에 많이 분포되는 것으로 보이며, 쌀겨와 쌀눈 등이 포함된 현미의 게르마늄 함량이 백미에 비해 높았다. 따라서 쌀을 이용하여 게르마늄을 섭취하려면 되도록 도정공정을 줄인 현미가 좋을 것으로 판단된다.



Table 2-30. 게르마늄 엽면 처리횟수에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량조사

Treatment times	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
1	1.89	8.51	8.39	1.55	0.67	0.45
2	1.67	7.53	7.42	2.97	0.87	0.60
3	2.02	9.08	8.96	57.8	1.73	1.59

1: 최고분얼기, 2: 최고분얼기+수잉기, 3: 최고분얼기+수잉기+출수기.

게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 쌀 부위별 게르마늄 흡수량과 및 게르마늄 효율은 Fig. 2-14에서 보는 바와 같다. 게르마늄 흡수량은 게르마늄함량에 생산량을 고려하여 계산하였고, 그 결과 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 게르마늄 흡수량은 3회 ≫ 2회 ≃ 1회이었고, 게르마늄 3회 처리시 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 쌀겨 ≫ 현미 > 백미 순이었으나, 게르마늄 1회 및 2회 처리시 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 쌀겨, 현미 및 백미 모두 비슷하였다. 특히 쌀겨의 게르마늄 함량은 게르마늄 3회 처리시 0.12 mg pot<sup>-1</sup>로 1회 및 2회 처리의 0.003-0.005 mg pot<sup>-1</sup>에 비해 매우 높았다.

벼 부위별 게르마늄 흡수율은 게르마늄 1회 및 2회 엽면처리시 쌀겨, 현미 및 백미가 별 차이 없이 매우 낮았다. 하지만 게르마늄 3회 엽면처리시 쌀겨 ≫ 현미 > 백미로 쌀겨의 흡수율이 매우 높았다. 특히 게르마늄 3회 엽면처리시 쌀겨는 게르마늄 흡수율이 3.9%로 가장 높았다.

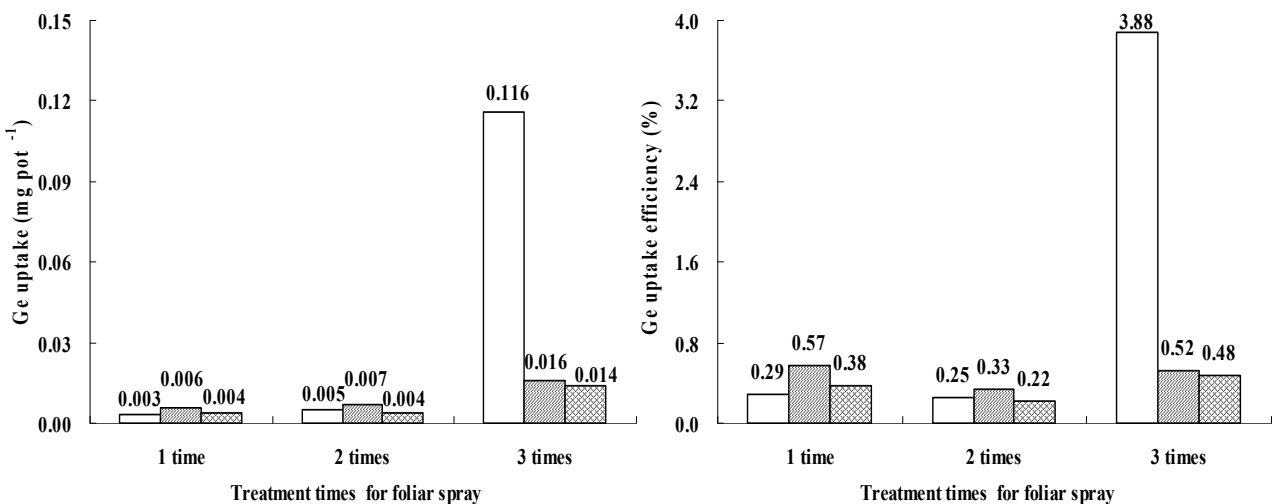


Fig. 2-14. 게르마늄 처리횟수에 따른 쌀 부위별 흡수량 및 흡수율.

□ : Rice bran, ▨ : Brown rice, ▩ : Polished rice.

#### ④ 게르마늄 엽면처리 횃수별 쌀 품질 및 식미치

게르마늄 엽면처리 횃수별 쌀 품질 및 식미치 특징을 조사한 결과 Table 2-31에서 보는 바와 같이 전반적으로 별 차이 없이 비슷한 경향이였다. 단백질 함량은 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot에서 10.7%로 가장 높았고, Amylose 함량은 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot에서 26.3%로 가장 높았다. 또한 알칼리 붕괴도는 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>에서 가장 좋았고, 모든 처리농도의 호화온도는 전반적으로 낮았으며, 쌀의 심복백은 모든 처리농도에서 거의 없었다. 쌀 중 질소의 함량은 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>에서 1.85%로 가장 높았고, 인 및 마그네슘의 함량은 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>에서 105.3 및 72.5 eq로 가장 높았다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 게르마늄 엽면처리 횃수별 쌀 품질 및 식미치는 엽면처리 농도에 따라 별 차이 없었다.

Table 2-31. 게르마늄 엽면처리 횃수별 쌀 품질 및 식미치

Treatment (mg kg <sup>-1</sup> )	WhiteCore & Velly (0-9)	Alkiline degree (1-7)	Gelatinization temperature Low/High	Amylose	Protein	N	P	Mg
				Contents	Contents			
				-----(%)-		--(eq)--		
Ge 0	0/1	3	Low	23.8	9.8	1.66	95.4	58.6
Ge 1	0/1	4	Low	24.7	10.2	1.71	99.2	62.5
Ge 2	0/1	4	Low	25.4	9.5	1.78	94.7	63.8
Ge 4	0/1	3	Low	24.1	8.9	1.62	88.3	68.9
Ge 8	0/1	5	Low	26.3	10.7	1.85	105.3	72.5
Ge 12	0/1	4	Low	25.5	9.8	1.81	101.9	71.4

#### (다) 게르마늄 종류별 엽면처리시 게르마늄 흡수 특성

게르마늄 종류별 엽면처리시 게르마늄 흡수 특성을 조사하기 위해 게르마늄 종류를 GeO<sub>2</sub>, Ge-132, Ge 표준용액 및 수도작용 액상게르마늄으로 구분하고, 엽면처리시 Ge 함량은 20 mg L<sup>-1</sup>으로 동일하게 조제하여 최고분얼기, 수잉기 및 출수기에 각각 50 mL씩 분무기로 분무하여 게르마늄 종류별 엽면처리시 벼 생육특성, 게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 벼 부위별 게르마늄 흡수량, 게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 쌀 부위별 게르마늄 함량, 게르마늄 종류별 엽면처리시 쌀 품질 및 식미치를 조사하였다.

#### ① 게르마늄 종류별 엽면처리시 벼 생육 특성

게르마늄 종류별 엽면처리시 벼 생육특성은 Fig. 2-15 및 Table 2-32~2-33에서 보는 바와 같다. 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육시기별 초장은 GeO<sub>2</sub>, Ge-132, Ge 표준용액 및 수도작용 액상게르마늄 모두에서 생육시기에 따라 별 차이 없이 비슷한 성장을 보였다. 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육시기별 잎수는 초장과 비슷한 경향으로 게르마늄 종류에 상관없이 비슷하였다.

게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 벼의 생육시기별 분얼수는 Ge-132, Ge 표준용액 및 수도

작용 액상게르마늄의 경우 생육시기에 따라 별 차이 없이 비슷하였으나, GeO<sub>2</sub>의 경우 수잉기에서 분얼수가 다른 게르마늄 처리에 비해 약간 많았다.

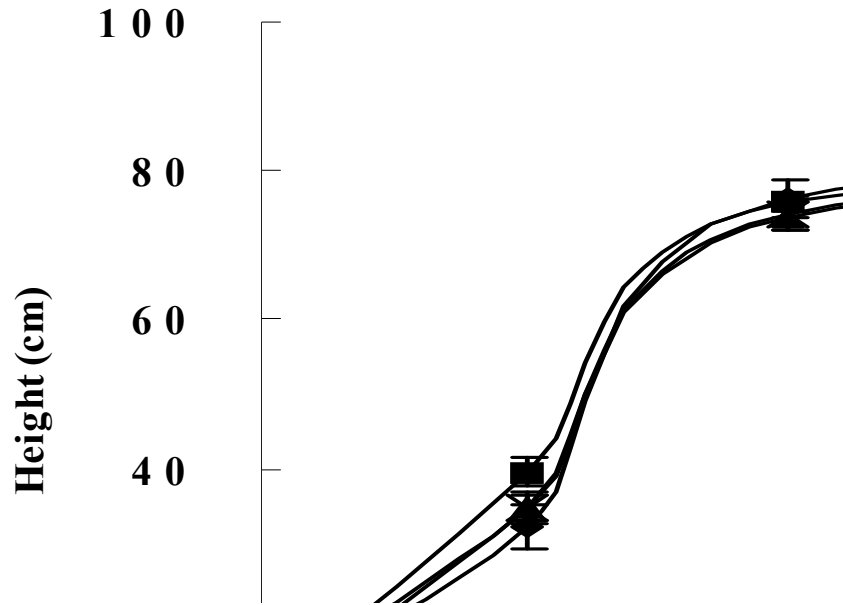


Fig. 2-15. 게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 벼 생육시기별 초장변화.

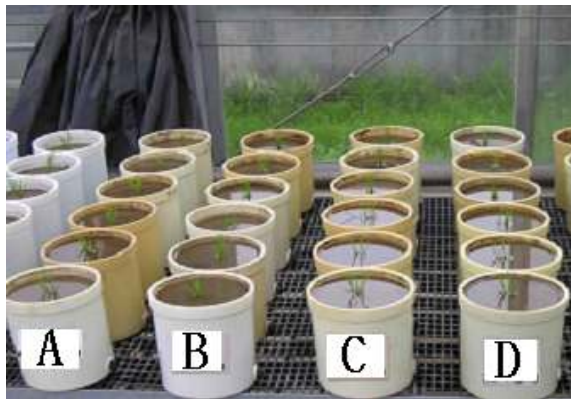
Table 2-32. 게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 벼의 생육시기별 잎수 변화

Treatment	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
	(ea plot <sup>-1</sup> )			
GeO <sub>2</sub>	19.0±0.4	24.8±2.3	60.0±4.3	—
Ge-132	21.0±0.8	27.3±3.2	65.5±8.3	—
Ge standard solution	20.0±0.5	23.8±2.7	59.2±6.5	—
Commercial Ge	17.0±0.7	25.0±4.0	59.0±3.6	—

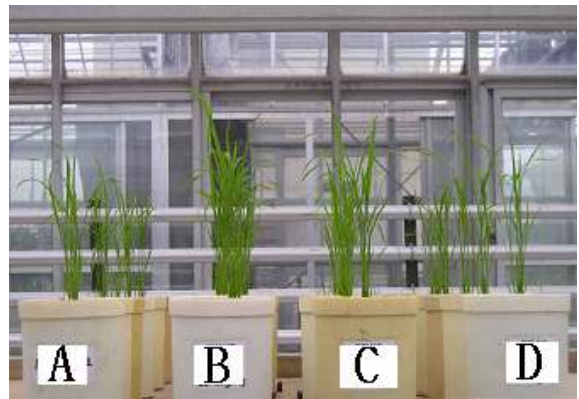
Table 2-33. 게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 벼의 생육시기별 분얼수 변화

Treatment	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
	(ea pot <sup>-1</sup> )			
GeO <sub>2</sub>	5.0±0.7	5.73±0.4	18.83±1.6	9.67±1.1
Ge-132	5.0±0.4	5.17±0.7	10.83±1.2	10.83±1.5
Ge standard solution	5.0±0.5	5.67±0.5	9.17±1.1	9.50±0.8
Commercial Ge	5.0±0.6	5.83±0.4	8.83±1.1	10.00±0.6

게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 생육시기별 생육상황은 Photo. 2-6에서 보는 바와 같이 모든 처리구에서 게르마늄 독성이 나타나지 않았다. 따라서 게르마늄 종류에 상관없이 Ge 20 mg L<sup>-1</sup>까지 처리된 pot에서는 게르마늄 독성이 벼에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.



이양직후



최고분얼기



수잉기



출수기

Photo. 2-6. 게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 벼의 생육시기별 생육상황.

A : GeO<sub>2</sub> (20 mg L<sup>-1</sup>),

B : Ge-132 (20 mg L<sup>-1</sup>),

C : Ge standard solution (20 mg L<sup>-1</sup>),

D : Ge material (20 mg L<sup>-1</sup>).

수확후 게르마늄의 종류에 따른 엽면살포시 벼 생육특성은 Table 2-34에서 보는 바와 같이 GeO<sub>2</sub>, Ge-132 및 Ge 표준용액의 경우 생육시기에 따라 별 차이 없이 비슷하였으나, 수도작용 액상게르마늄은 다른 게르마늄에 비해 초장, 수장, 수수 및 천립중이 떨어져 수량이 약간 감소되었다. 이는 수도작용 게르마늄액은 게르마늄의 흡수를 용이하게 조제되었기 때문에 동일함량에서도 벼의 독성 증가로 수량이 감소된 것으로 판단된다. 따라서 수도작용 게르마늄은 다른 게르마늄에 비해 함량을 줄여 사용해야 할 것으로 판단된다.

Table 2-34. 게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 벼의 생육특성

Treatment	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	No. panicle per hill	No. grain per panicle	1,000 grain (g)	Yield (g pot <sup>-1</sup> )	T/R ratio
GeO <sub>2</sub>	58.0±2.0	18.9±1.0	9.0±0.6	83	21.60	11.1	4.42
Ge-132	57.3±2.1	17.5±1.3	10.5±1.5	72	20.73	9.4	4.15
Ge standard solution	58.7±1.8	18.0±1.0	8.5±0.5	81	21.27	9.5	3.96
Commercial Ge	56.2±2.0	19.5±0.5	9.2±1.1	84	20.51	9.1	3.20

② 게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 벼 부위별 게르마늄 함량

게르마늄 종류별에 따른 엽면처리시 벼 부위별 건물중량 및 게르마늄 함량은 Table 2-35에서 보는 바와 같이 잎, 줄기 및 뿌리로 나누어 조사하였다.

벼 부위별 건물중량은 잎, 줄기 및 뿌리가 각각 5.38-5.95, 8.87-9.80 및 5.95-7.61 g pot<sup>-1</sup>의 범위로 게르마늄 종류와 상관없이 유사하였다. 벼 부위별 게르마늄 함량은 잎의 경우 GeO<sub>2</sub>와 Ge 표준용액 처리가 다른 게르마늄 처리에 비해 약간 높은 함량을 보였으나, 뿌리의 경우 상대적으로 잎과 줄기에 비해 게르마늄 함량이 매우 낮았다. 줄기의 게르마늄 함량은 수도작용 액상게르마늄을 제외한 게르마늄들은 비슷한 함량을 보였으나, 수도작용 액상게르마늄은 다른 게르마늄에 비해 매우 낮은 함량을 보였다.

Table 2-35. 게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 벼 부위별 게르마늄 함량

Treatment	Dry weight (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
GeO <sub>2</sub>	5.47	9.03	5.95	20.2	12.6	0.037
Ge-132	5.95	9.80	6.25	15.8	10.8	0.039
Ge standard solution	5.38	8.87	6.68	21.8	15.0	0.032
Commercial Ge	5.63	9.29	7.61	16.9	5.53	0.035

게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량 및 게르마늄 흡수율은 Fig. 2-16에서 보는 바와 같다. 게르마늄 흡수량은 게르마늄 함량에 건물중량을 고려하여 계산하였고, 그 결과 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 잎 ≧ 줄기 ≫ 뿌리 순이었으며, GeO<sub>2</sub>, Ge-132 및 Ge 표준용액은 비슷한 게르마늄 흡수량을 보인 반면 수도작용 액상게르마늄은 다른 게르마늄에 비해 흡수량이 약간 낮은 경향이었다.

벼 부위별 게르마늄 흡수율은 전반적으로 잎과 줄기에서 가장 높았고, 뿌리는 잎과 줄기에 비해 아주 낮았다. 게르마늄 흡수율은 잎의 경우 Ge 표준용액이 4.4%로 가장 높았으며, 줄기의 경우 Ge 표준용액이 3.4%로 가장 높은 반면에 수도작용 액상게르마늄이 1.7%로 가장 낮았다. 또한 뿌리의 게르마늄 흡수율은 게르마늄 종류에 상관없이 매우 낮았다.

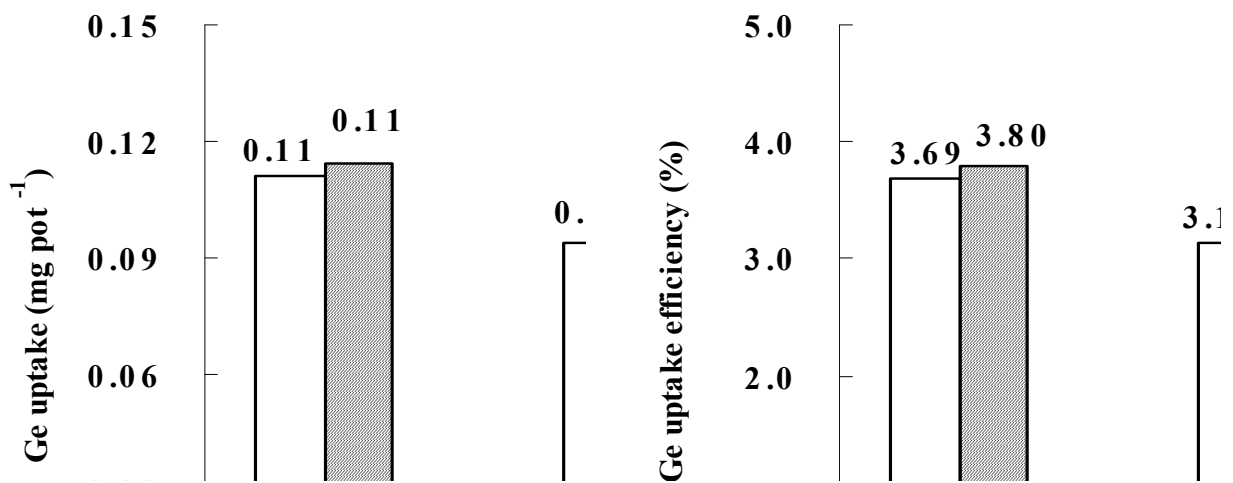


Fig. 2-16. 게르마늄 종류별 엽면처리시 벼 부위별 흡수량 및 흡수율.

□ : Leaf, ▨ : Stem, ▩ : Root.

### ③ 게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 쌀 부위별 게르마늄 함량

게르마늄 종류에 따른 쌀 부위별 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-36에서 보는 바와 같이 쌀겨, 현미 및 백미로 나누어 조사하였다. 쌀 부위별 생산량은 쌀겨, 현미 및 백미가 각각 1.6-2.0, 7.4-9.0 및 7.3-8.9 g pot<sup>-1</sup>의 범위이었으며, Ge-132, Ge 표준용액 및 수도작용 액상게르마늄의 경우 생산량이 별 차이 없었으나, GeO<sub>2</sub>의 경우 다른 게르마늄 처리에 비해 생산량이 약간 많았다. 따라서 GeO<sub>2</sub>는 다른 게르마늄에 비해 쌀에 용이하게 흡수되는 것으로 판단된다.

쌀 부위별 게르마늄 함량을 조사한 결과 전반적으로 쌀겨 ≧ 현미 > 백미 순이었으며, 쌀겨에서는 GeO<sub>2</sub>처리가 다른 게르마늄 처리에 비해 매우 높은 함량을 보였고, 현미는 모든 게르마늄에서 비슷한 함량을 보였다. 백미는 GeO<sub>2</sub>처리가 다른 게르마늄 처리에 비해 약간 높았다. 전반적으로 Ge-132 처리에서 다른 게르마늄 처리에 비해 낮은 게르마늄 함량을 보였다. 이는 Ge-132의 경우 유기게르마늄이기 때문에 식물에 의한 흡수 및 이동이 다른 무기게르마늄에 비해 용이하지 않기 때문으로 사료된다. 특히 게르마늄은 쌀의 껍질에 많이 분포되는 것으로 보

이며, 쌀겨와 쌀눈 등이 포함된 현미의 게르마늄 함량이 백미에 비해 높았다. 따라서 쌀을 이용하여 게르마늄을 섭취하려면 되도록 도정공정을 줄인 현미가 좋을 것으로 판단된다.

Table 2-36. 게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 쌀 부위별 게르마늄 함량

Treatment	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
GeO <sub>2</sub>	2.02	9.08	8.96	57.8	1.73	1.59
Ge-132	1.71	7.69	7.59	24.3	1.33	0.98
Ge standard solution	1.73	7.77	7.67	27.2	1.57	0.99
Commercial Ge	1.65	7.44	7.34	25.7	1.89	1.17

게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 쌀 부위별 흡수량 및 게르마늄 흡수율은 Fig. 2-17에서 보는 바와 같다. 게르마늄 흡수량은 게르마늄 함량에 생산량을 고려하여 계산하였고, 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 쌀겨 >> 현미 > 백미 순이었으며, GeO<sub>2</sub> 처리는 다른 게르마늄 처리에 비해 흡수량이 약간 높은 경향이였다. 특히 GeO<sub>2</sub>로 처리한 pot에서의 게르마늄 흡수량은 쌀겨에서 0.12 mg pot<sup>-1</sup>로 다른 게르마늄에 비해 가장 많은 흡수량을 보였다.

며 부위별 게르마늄 흡수율은 전반적으로 쌀겨 > 현미 > 백미 순으로 쌀겨에서 가장 높았다. 게르마늄 흡수율은 쌀겨의 경우 GeO<sub>2</sub>가 3.9%로 가장 높았고, 현미와 백미의 경우도 GeO<sub>2</sub> 처리가 다른 게르마늄 처리에 비해 가장 높았다.

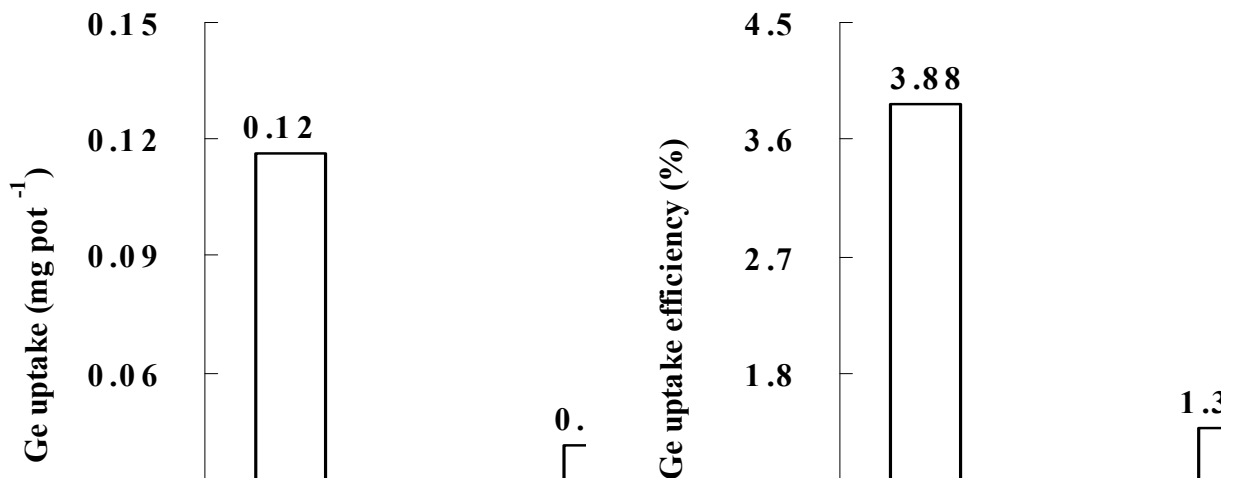


Fig. 2-17. 게르마늄 종류별 엽면처리시 쌀 부위별 흡수량 및 흡수율.

□ : Rice bran, ▨ : Brown rice, ▩ : Polished rice.

#### ④ 게르마늄 종류별 엽면처리시 농도별 쌀 품질 및 식미치

게르마늄 종류별 엽면처리 농도별 쌀 품질 및 식미치 특징을 조사한 결과 Table 2-37에서 보는 바와 같이 게르마늄 종류에 관계없이 전반적으로 비슷한 경향이였다. 단백질 함량은 게르마늄 종류에 상관없이 대체적으로 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot에서 9.3-10.7%로 가장 높았고, Amylose 함량도 게르마늄 종류에 상관없이 대체적으로 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot에서 26.5-29.4%로 가장 높았다. 또한 알칼리 붕괴도도 게르마늄 종류에 상관없이 대체적으로 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>에서 가장 좋았고, 모든 게르마늄 종류별 처리농도의 호화온도는 전반적으로 낮았으며, 쌀의 심복백은 모든 처리농도에서 거의 없었다. 쌀 중 질소의 함량은 게르마늄 종류에 상관없이 대체적으로 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>에서 1.74-1.91%로 가장 높았고, 인 및 마그네슘의 함량도 게르마늄 종류에 상관없이 대체적으로 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>에서 97.6-105.73 및 69.4-74.6 eq로 가장 높았다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 게르마늄 종류별 엽면처리시 쌀 품질 및 식미치는 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없었다.



Table 2-37. 게르마늄 종류별 엽면처리 농도별 쌀 품질 및 식미치

Treatment	Treatment (mg kg <sup>-1</sup> )	WhiteCore & Velly (0-9)	Alkiline degree (1-7)	Gelatinization temperature Low/High	Amylose Contents	Protein Contents (%)	N	P	Mg
								--(eq)--	
GeO <sub>2</sub>	Ge 0	0/1	3	Low	26.9	9.3	1.71	96.4	70.7
	Ge 1	0/1	5	Low	24.5	9.9	1.83	92.7	71.9
	Ge 2	0/1	4	Low	23.3	9.2	1.75	96.6	64.9
	Ge 4	0/1	4	Low	28.1	10.2	1.69	102.5	74.6
	Ge 8	0/1	5	Low	28.5	10.7	1.91	105.7	72.9
	Ge 12	0/1	3	Low	26.5	9.5	1.81	99.2	74.1
Ge-132	Ge 0	0/1	5	Low	25.9	9.5	1.55	93.9	68.9
	Ge 1	0/1	4	Low	26.1	9.8	1.77	98.0	65.6
	Ge 2	0/1	4	Low	28.7	10.3	1.69	100.4	72.9
	Ge 4	0/1	3	Low	24.4	9.3	1.86	96.3	71.1
	Ge 8	0/1	5	Low	29.4	10.9	1.95	102.3	74.6
	Ge 12	0/1	5	Low	27.7	10.7	1.92	98.4	72.4
Ge standard solution	Ge 0	0/1	3	Low	26.6	9.5	1.63	95.5	66.2
	Ge 1	0/1	4	Low	25.8	9.2	1.56	98.3	69.5
	Ge 2	0/1	4	Low	27.2	8.9	1.78	101.8	72.8
	Ge 4	0/1	5	Low	29.7	9.7	1.82	104.7	68.5
	Ge 8	0/1	4	Low	26.9	9.3	1.74	97.6	73.6
	Ge 12	0/1	3	Low	27.9	10.1	1.87	99.8	74.4
Commer- cial Ge	Ge 0	0/1	5	Low	22.6	9.4	1.73	96.4	68.6
	Ge 1	0/1	3	Low	25.1	9.9	1.74	101.9	65.3
	Ge 2	0/1	3	Low	27.4	9.3	1.64	103.4	63.6
	Ge 4	0/1	4	Low	24.3	10.3	1.87	95.9	72.1
	Ge 8	0/1	4	Low	26.5	10.2	1.81	98.3	69.4
	Ge 12	0/1	4	Low	26.8	9.8	1.79	94.2	67.2

### 3. 연구결과 요약

게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술을 개발하기 위해 현재 유통중인 게르마늄 함유 농산물 중 게르마늄 함량을 조사하고, 이들 기초 결과들을 바탕으로 하여 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술을 개발하고자 하였다. 유통중인 게르마늄 함유 농산물의 게르마늄 함량은 곡류, 엽채류 및 과채류로 분류하여 각각 조사하였고, 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술 개발 연구는 벼의 게르마늄 토양처리시 생육촉진 및 독성 발생범위 구명과 벼의 게르마늄 엽면살포시 생육촉진

및 독성 발생범위 구명으로 구분하여 각각 조사하였다. 벼의 게르마늄 토양처리시 생육촉진 및 독성 발생범위 구명은 게르마늄의 토양처리 농도별 및 게르마늄 종류별로 나누어 조사하였고, 벼의 게르마늄 엽면살포시 생육촉진 및 독성발생범위 구명은 게르마늄의 엽면처리 농도별, 게르마늄 엽면처리 횟수별 및 게르마늄 종류별로 나누어 조사하였다.

유통중인 게르마늄 함유 농산물 중 게르마늄 함량을 조사한 결과 대부분의 게르마늄 함유 곡류, 엽채류 및 과채류의 게르마늄 함량이 관행재배 농산물의 게르마늄 함량에 비해 약간 높거나 별 차이가 없었으며, 일부 품목의 경우 자연함유량과 비슷한 수준을 보여 게르마늄 함유 농산물의 게르마늄 함량 검정과 게르마늄 함유 쌀 생산을 위한 체계적인 재배기술이 필요할 것으로 판단된다.

벼의 게르마늄 토양처리시 생육촉진 및 독성발생범위 구명을 위한 게르마늄 토양처리 농도별 게르마늄 흡수 특성을 조사한 결과 게르마늄 처리농도가 증가할수록 게르마늄 독성 (phytotoxicity)이 증가 하였으며, 독성의 증가로 초장, 수장, 수수 및 천립중이 떨어져 수량이 감소되었다. 게르마늄  $8 \text{ mg kg}^{-1}$  이상에서 부터 게르마늄 독성이 나타났으며, 벼의 정상적인 생육을 위해서는 그 이하의 농도로 게르마늄을 처리하여야 할 것으로 판단된다. 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 잎 > 줄기 >> 뿌리 순이었으며, 특히  $\text{Ge } 12 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 처리한 pot에서 줄기 및 뿌리의 게르마늄 흡수량은 각각 254, 87.6 및  $0.2 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 가장 많은 흡수량을 보였다. 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 쌀겨 >> 현미 > 백미 순이었으며, 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 전반적으로 쌀겨에서 가장 높았고, 현미와 백미는 쌀겨에 비해 약간 낮았다.

게르마늄 종류별 토양처리시 게르마늄 흡수 특성은 전반적으로 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없었으며, 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 잎 > 줄기 >> 뿌리 순이었으며,  $\text{Ge-132}$ 는 다른 게르마늄에 비해 흡수량이 약간 낮은 경향이였다. 쌀 부위별 게르마늄 함량은 쌀겨, 현미 및 백미 모두에서  $\text{GeO}_2$ 가 다른 게르마늄 처리에 비해 높은 함량을 보였다. 특히 게르마늄은 쌀의 껍질에 많이 분포되는 것으로 보이며, 쌀겨와 쌀눈 등이 포함된 현미의 게르마늄 함량이 백미에 비해 높았다. 따라서 쌀을 이용하여 게르마늄을 섭취하려면 되도록 도정공정을 줄인 현미가 좋을 것으로 판단된다.

벼의 게르마늄 엽면살포시 생육촉진 및 독성 발생범위 구명을 위한 게르마늄 엽면처리 농도별 게르마늄 흡수 특성을 조사한 결과 게르마늄 엽면처리 농도가 증가 할수록 초장, 수장, 수수, 천립중 및 생산량이 점점 감소되는 경향이였다. 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 줄기와 잎은 비슷하였고, 상대적으로 뿌리는 매우 적은 흡수량을 보였다. 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 쌀겨 >> 현미 > 백미 순이었으며, 게르마늄 흡수율은 전반적으로 쌀겨에서 가장 높았고, 현미와 백미는 쌀겨에 비해 약간 낮았다.

게르마늄 엽면처리 횟수별 게르마늄 흡수특성은 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 잎 > 줄기 >> 뿌리 순으로 잎과 뿌리의 경우 처리횟수에 상관없이 비슷한 경향을 보인 반면 줄기의 경우 게르마늄 처리횟수가 증가함에 따라 게르마늄 흡수량도 증가하였다. 게르마늄 처

리횃수에 따른 게르마늄 흡수량은 3회 ≫ 2회 ≒ 1회이었고, 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 게르마늄 처리횃수 3회의 경우 쌀겨 ≫ 현미 > 백미로 쌀겨의 흡수율이 매우 높았다.

게르마늄 종류별 엽면처리시 게르마늄 흡수 특성을 조사한 결과 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 잎 ≒ 줄기 ≫ 뿌리 순이었으며, GeO<sub>2</sub>, Ge-132 및 Ge 표준용액은 비슷한 게르마늄 흡수량을 보인 반면 수도작용 액상게르마늄은 다른 게르마늄에 비해 흡수량이 약간 낮은 경향이였다. 게르마늄 종류에 따른 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 전반적으로 쌀겨 ≫ 현미 > 백미 순이었으며, GeO<sub>2</sub> 처리는 다른 게르마늄 처리에 비해 흡수량이 약간 높은 경향이였다.

## II. 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배법 개발

### 1. 재료 및 방법

#### 가. 공시 재료

##### (1) 공시 토양

벼 재배 시험은 경남 진주시 가좌동에 위치한 경상대학교 부속농장 유리온실에서 실시하였으며, 실험에 사용한 공시 토양은 총 4 종류로서 국제토양학회 분류기준에 의해 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토로 구분하여 사용하였다. 공시 토양의 이화학적 특성과 토성은 Table 2-38 및 2-39에서 보는 바와 같다. 공시 토양 중 미사질양토는 모래, 미사 및 점토가 각각 82.2, 15.4 및 2.4%이었고, 식양토는 모래, 미사 및 점토가 각각 55.4, 23.3 및 16.4%이었으며, 양토는 모래, 미사 및 점토가 각각 64.8, 29.8 및 5.4%이었고, 사양토는 모래, 미사 및 점토가 각각 43.1, 51.6 및 5.4%이었다. 미사질양토는 진주시 내동면에 소재한 논 (35°09'N, 128°06'E)에서 채취하였으며, 식양토는 사천시 송포동에 소재한 논 (34°58'N, 128°03'E)에서 채취하였고, 양토 및 사양토는 경상대학교 부속농장 (35°08'N, 128°05'E)에 위치한 시험용 재배포에서 각각 채취하였다.

Table 2-38. 공시 토양의 이화학적 특성

Soil texture	pH (1:5)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	O.M. (g kg <sup>-1</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	SiO <sub>2</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	Ex.Cat (cmol+ kg <sup>-1</sup> )			
						K	Ca	Mg	Na
Silt loam	5.8	0.52	3.4	346.9	192.0	0.08	5.42	0.50	0.04
Clay loam	6.1	0.85	10.2	5812.9	622.6	1.95	15.51	2.13	0.26
Loam	6.3	0.64	9.4	1355.6	185.7	0.46	9.09	1.37	0.26
Sandy loam	5.7	0.58	3.4	503.7	125.8	0.14	4.66	0.33	0.07

Table 2-39. 공시 토양의 토성

Soil texture <sup>¶</sup>	Sand	Silt	Clay
	(%)		
Silt loam	82.2	15.4	2.4
Clay loam	55.4	23.3	16.4
Loam	64.8	29.8	5.4
Sandy loam	43.1	51.6	5.4

¶국제토양학회 분류기준.

##### (1) 공시 벼

공시 벼는 Table 2-40에서 보는 바와 같이 중만생종인 호평, 주남, 일미 및 동진벼를 사용하

였으며, 벼는 초장 약 12 cm 정도인 어린모를 2007년 6월 21일에 1 5,000a<sup>-1</sup> 와그너 pot에 이양하여 2007년 11월 1일에 수확하였다.

Table 2-40. 공시 벼의 주요특징

Rice	Quality	Disease tolerance	Adaptability	Used	Remark
Hopyung	고품질, 밥맛양호	도열병, 흰잎마름병	이양재배용	밥쌀용	숙색양호
Junam	고품질, 다수성	흰잎마름병, 줄무늬잎마름병	양식미	밥쌀용	단간, 내도복성
Ilmee	고품질, 다수성	흰잎마름병, 호엽고병	직파적응성	밥쌀용	강간, 내도복성
Dongiin	고품질, 다수성	도열병, 흰잎마름병	이양재배용	밥쌀용	직립, 강간 내도복성

### (3) 공시 게르마늄

실험에 사용된 공시 게르마늄은 GeO<sub>2</sub> 및 Ge-132 (2-Carboxyethyl germanium sesquioxide; (GeCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>COOH)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)를 사용하였다. GeO<sub>2</sub> 및 Ge-132는 물에 녹여 액상으로 조제한 후 일정 농도로 희석하여 사용하였다.

#### 나. 실험방법

##### (1) 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 구명

벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 조사는 게르마늄 쌀 생산기술 개발을 위한 최적 품종을 선정하기 위해 호평, 주남, 일미 및 동진벼의 4품종에서 게르마늄 무처리, 토양처리 및 엽면처리로 구분하여 벼 품종별 벼의 생육특성, 벼 품종별 토양 중 무기성분 함량 변화, 벼 품종에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성, 벼 품종에 따른 쌀 미질 특성을 각각 조사하였고, 이들 결과를 이용하여 최적 품종을 선정하였다.

품종별 게르마늄의 토양처리는 pot에 이양하기 전의 미사질양토 4 kg에 GeO<sub>2</sub> (32 mg L<sup>-1</sup>) 1 L를 주입하여 토양과 골고루 혼합 조제하여 최종 Ge 함량이 8 mg kg<sup>-1</sup>되게 처리한 후 4 종류의 벼를 각 pot에 이양하였다. 품종별 게르마늄의 엽면처리는 pot에 이양하기 전의 미사질양토 4 kg에 물 1 L를 주입하여 토양과 골고루 혼합 조제하여 상기 토양처리와 수분조건을 동일하게 한 후 벼를 이양하였다. 엽면처리시 게르마늄의 처리는 1년차 연구결과를 토대로 하여 214 mg L<sup>-1</sup>인 GeO<sub>2</sub> 용액을 최고분얼기, 수잉기 및 출수기에 각각 50 mL씩 분무기로 분무하여 최종 Ge 함량을 토양처리와 같은 8 mg kg<sup>-1</sup>되게 처리하였다.

벼 품종별 게르마늄의 토양처리와 엽면처리에 사용된 pot는 1 5,000a<sup>-1</sup> 와그너 pot를 사용하였으며, pot당 토양은 4 kg을 채워 넣었다. 각 pot (1 5,000a<sup>-1</sup>)당 4 품종의 벼를 각각 7주씩 이

양하였으며, 시험구는 6반복 완전임의배치법으로 하였다. 시비는 농업과학기술원 작물별 시비 처방 기준에 따른 표준시비량으로  $N-P_2O_5-K_2O = 12-3-3 \text{ kg } 10a^{-1}$  ( $N-P_2O_5-K_2O = 0.4-0.10-0.10 \text{ g pot}^{-1}$ )되게 시비하였다. N,  $P_2O_5$  및  $K_2O$ 의 시비에는 각각 요소, 용과린 및 염화칼리 비료를 사용하였다. 질소와 칼리의 분시비율은 밀거름, 분얼비, 수비 및 실비를 각각 50, 20, 20 및 10%로 하였으며, 관수 및 기타재배는 관행재배법에 준하였다.

#### (가) 벼 품종별 벼의 생육특성

벼 품종별 벼의 생육특성 조사는 벼 이앙 후, 최고분얼기, 수잉기 및 출수기에 벼의 품종별 초장, 분얼수 및 잎수를 각각 조사하였고, 쌀 수확 후에 수장, 간장, 천립중, 총립수, T/R율, 생체중량, 건조중량 및 수수를 각각 조사하였다.

#### (나) 벼 품종별 토양 중 무기성분 함량 변화

벼 품종별 토양 중 무기성분 함량 조사는 벼 수확 후 토양 중 T-N,  $P_2O_5$ ,  $SiO_2$ , K, Ca, Mg 및 Na 함량을 각각 조사하였다.

#### (다) 벼 품종에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성

##### ① 벼 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

벼 부위별 게르마늄 함량조사는 벼를 잎, 줄기 및 뿌리로 각각 나누어 각 부위별 게르마늄 함량을 조사하였다. 또한 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 상기 조사된 벼 부위별 게르마늄 함량에 각 부위별 건물중을 고려하여 계산하였다.

##### ② 쌀 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

쌀 부위별 게르마늄 함량조사는 쌀을 쌀겨, 현미 및 백미로 각각 나누어 각 부위별 게르마늄 함량을 조사하였다. 또한 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 상기 조사된 쌀 부위별 게르마늄 함량에 부위별 쌀 생산량을 고려하여 계산하였다.

##### ③ 벼 품종에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율 비교

벼 품종에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 게르마늄 주입량에 대한 품종별 잎, 줄기, 뿌리, 쌀겨, 현미 및 백미에 각각 흡수된 게르마늄 흡수량의 비율을 조사하여 비교하였다.

#### (라) 벼 품종에 따른 쌀 미질 특성

벼 품종에 따른 쌀 미질 특성을 조사하기 위해 벼 수확 후 벼의 품종별 쌀의 심복백, 알카리 붕괴도, 호화온도, 아밀로스, 단백질, 질소, 인 및 마그네슘 함량을 각각 조사하였다.

#### (마) 최적 품종 선정

게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 품종을 선정하기 위해 벼의 생육상황, 생산량, 게르마늄 저항성 및 쌀의 미질 등의 일반적인 특성과 부위별 게르마늄 흡수 특성을 전체적으로 비교하여 최적 품종을 선정하였다.

#### (2) 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배조건 구명

게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배조건을 구명하기 위해 상기 가. 항의 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 조사를 통한 최적 품종 하에서 토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성, 게르마늄 처리방법 별 벼의 게르마늄 흡수 특성 및 게르마늄 종류에 따른 처리횟수별 벼의 게르마늄 흡수 특성을 각각 조사하였다.

#### (가) 토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성 구명

토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성 조사는 게르마늄 쌀 생산기술 개발을 위한 최적 토성을 선정하기 위해 상기 가. 항의 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 조사를 통한 최적 품종 하에서 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토의 4종류 토성으로 구분하여 토성별 벼의 생육특성, 토성별 토양 중 무기성분 함량 변화, 토성에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성, 토성에 따른 쌀 미질 특성을 각각 조사하였고 이들 결과를 이용하여 최적 토성을 선정하였다.

토성별 게르마늄의 토양처리는 pot에 이양하기 전의 각 토양 4 kg에  $\text{GeO}_2$  ( $32 \text{ mg L}^{-1}$ ) 1 L를 주입하여 토양과 골고루 혼합 조제하여 최종 Ge 함량이  $8 \text{ mg kg}^{-1}$ 되게 처리한 후 최적품종으로 선정된 벼를 각 pot에 이양하였다. 토양에 게르마늄 처리방법과 비료 시비방법은 상기 가. 항의 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 구명과 동일하게 하였다.

#### ① 토성별 벼의 생육특성

토성별 벼의 생육특성 조사는 벼 이양 후, 최고분얼기, 수잉기 및 출수기에 벼의 품종별 초장, 분얼수 및 잎수를 각각 조사하였고, 쌀 수확 후에 수장, 간장, 천립중, 총립수, T/R율, 생체중량, 건조중량 및 수수를 각각 조사하였다.

#### ② 토성별 토양 중 무기성분 함량 변화

토성별 토양 중 무기성분 함량 조사는 벼 수확 후 토양 중 T-N,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SiO}_2$ , K, Ca, Mg 및 Na 함량을 각각 조사하였다.

#### ③ 토성에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성

#### ㉞ 벼 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

토성에 따른 벼 부위별 게르마늄 함량조사는 벼를 잎, 줄기 및 뿌리로 각각 나누어 각 부위별 게르마늄 함량을 조사하였다. 또한 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 상기 조사된 벼 부위별 게

르마늄 함량에 벼 부위별 건물중을 고려하여 계산하였다.

#### ㉞ 쌀 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

토성에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량조사는 쌀을 쌀겨, 현미 및 백미로 각각 나누어 각 부위별 게르마늄 함량을 조사하였다. 또한 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 상기 조사된 쌀 부위별 게르마늄 함량에 부위별 쌀 생산량을 고려하여 계산하였다.

#### ㉟ 토성에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율 비교

토성에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 게르마늄 주입량에 대한 품종별 잎, 줄기, 뿌리, 쌀겨, 현미 및 백미에 흡수된 게르마늄 양의 비율을 조사하여 비교하였다.

#### ④ 토성에 따른 쌀 미질 특성

토성에 따른 쌀 미질 특성을 조사하기 위해 벼 수확 후 벼의 품종별 쌀의 심복백, 알카리붕괴도, 호화온도, 아밀로스, 단백질, 질소, 인 및 마그네슘 함량을 각각 조사하였다.

#### ⑤ 최적 토성 선정

게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 토성을 선정하기 위해 벼의 생육상황, 생산량, 게르마늄 저항성 및 쌀의 미질 등의 일반적인 특성과 부위별 게르마늄 흡수 특성을 전체적으로 비교하여 최적 토성을 선정하였다.

#### (나) 게르마늄 처리방법별 벼의 게르마늄 흡수 특성 구명

게르마늄 처리방법별 벼의 게르마늄 흡수 특성 조사는 게르마늄 쌀 생산기술 개발을 위한 최적 게르마늄 처리방법을 선정하기 위해 상기 가. 항의 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 조사를 통한 최적 품종과 (2) (가) 항의 토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성을 통한 최적 토성 하에서 게르마늄 처리방법을 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리로 구분하여 게르마늄 처리방법별 벼의 생육특성, 게르마늄 처리방법별 토양 중 무기성분 함량 변화, 게르마늄 처리방법에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성, 게르마늄 처리방법에 따른 쌀 미질 특성을 각각 조사하였고, 이들 결과를 이용하여 최적 게르마늄 처리방법을 선정하였다.

게르마늄 처리방법 중 토양처리는 최적 토성인 토양 4 kg에  $\text{GeO}_2$  ( $32 \text{ mg L}^{-1}$ ) 1 L를 주입하여 토양과 골고루 혼합 조제하여 최종 Ge 함량이  $8 \text{ mg kg}^{-1}$ 되게 처리한 후 최적품종으로 선정된 벼를 각 pot에 이양하였다.

엽면처리는 최적 토성인 토양 4 kg에 물 1 L를 주입하여 토양과 골고루 혼합 조제하여 상기 토양처리와 수분조건을 동일하게 한 후 최적 품종으로 선정된 벼를 이양하였다. 엽면처리시 게르마늄의 처리는 1년차 연구결과를 토대로 하여  $214 \text{ mg L}^{-1}$ 인  $\text{GeO}_2$  용액을 최고분얼기, 수잉기 및 출수기에 각각 50 mL씩 분무기로 분무하여 최종 Ge 함량을 토양처리와 같은  $8 \text{ mg}$



kg<sup>-1</sup>되게 처리하였다.

토양·엽면 동시처리는 우선 토양처리의 경우 최적 토성인 토양 4 kg에 GeO<sub>2</sub> (16 mg L<sup>-1</sup>) 1 L를 주입하여 토양과 골고루 혼합 조제하여 토양 중 Ge 함량이 4 mg kg<sup>-1</sup>되게 처리하였고, 엽면처리의 경우 107 mg L<sup>-1</sup>인 GeO<sub>2</sub> 용액을 최고분얼기, 수잉기 및 출수기에 각각 50 mL씩 분무기로 분무하여 엽면처리된 Ge 함량을 4 mg kg<sup>-1</sup>되게 하여 최종 Ge 함량을 토양처리 및 엽면처리와 같은 8 mg kg<sup>-1</sup>되게 처리하였다.

토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리의 게르마늄 처리방법과 비료 시비방법은 상기가. 항의 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 구명과 동일하게 하였다.

#### ① 게르마늄 처리방법별 벼의 생육특성

게르마늄 처리방법별 벼의 생육특성 조사는 벼 이앙 후, 최고분얼기, 수잉기 및 출수기에 벼의 품종별 초장, 분얼수 및 잎수를 각각 조사하였고, 쌀 수확 후에 수장, 간장, 천립중, 총립수, T/R율, 생체중량, 건조중량 및 수수를 각각 조사하였다.

#### ② 게르마늄 처리방법별 토양 중 무기성분 함량 변화

게르마늄 처리방법별 토양 중 벼의 무기성분 함량 조사는 벼 수확 후 토양 중 T-N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub>, K, Ca, Mg 및 Na 함량을 각각 조사하였다.

#### ③ 게르마늄 처리방법에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성

##### ㉠ 벼 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

게르마늄 처리방법에 따른 벼 부위별 게르마늄 함량조사는 벼를 잎, 줄기 및 뿌리로 각각 나누어 각 부위별 게르마늄 함량을 조사하였다. 또한 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 상기 조사된 벼 부위별 게르마늄 함량에 부위별 건물중을 고려하여 계산하였다.

##### ㉡ 쌀 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

게르마늄 처리방법에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량조사는 쌀을 쌀겨, 현미 및 백미로 각각 나누어 각 부위별 게르마늄 함량을 조사하였다. 또한 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 상기 조사된 쌀 부위별 게르마늄 함량에 부위별 쌀 생산량을 고려하여 계산하였다.

##### ㉢ 게르마늄 처리방법에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율 비교

게르마늄 처리방법에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 게르마늄 주입량에 대한 품종별 잎, 줄기, 뿌리, 쌀겨, 현미 및 백미에 흡수된 게르마늄 흡수량의 비율을 조사하여 비교하였다.

#### ④ 게르마늄 처리방법에 따른 쌀 미질 특성

게르마늄 처리방법에 따른 쌀 미질 특성을 조사하기 위해 벼 수확 후 벼의 품종별 쌀의 심

복백, 알카리붕괴도, 호화온도, 아밀로스, 단백질, 질소, 인 및 마그네슘 함량을 각각 조사하였다.

#### ⑤ 최적 게르마늄 처리방법 선정

게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 게르마늄 처리방법을 선정하기 위해 벼의 생육 상황, 생산량, 게르마늄 저항성 및 쌀의 미질 등의 일반적인 특성과 부위별 게르마늄 흡수 특성을 전체적으로 비교하여 최적 게르마늄 처리방법을 선정하였다.

#### (다) 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 게르마늄 흡수 특성 구명

게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 게르마늄 흡수 특성 조사는 게르마늄 쌀 생산 기술 개발을 위한 최적 게르마늄 및 토양처리 횟수를 선정하기 위해 상기 가. 항의 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 조사를 통한 최적 품종과 (2) (가) 항의 토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성 조사를 통한 최적 토성 그리고 (2) (나) 항의 게르마늄 처리방법별 벼의 게르마늄 흡수 특성 조사를 통한 최적 게르마늄 처리방법 하에서 무기게르마늄 ( $\text{GeO}_2$ )과 유기게르마늄 (Ge-132)으로 구분하여 벼 이앙 후 게르마늄 토양처리 횟수를 1회 (최고분얼기), 2회 (최고분얼기 및 수잉기) 및 3회 (최고분얼기, 수잉기 및 출수기)로 각각 처리하여 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 생육특성, 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 토양 중 무기성분 함량 변화, 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성, 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 쌀 미질 특성을 각각 조사하였고, 이들 결과를 이용하여 최적 게르마늄 및 토양처리 횟수를 선정하였다.

게르마늄 토양처리 횟수 중 토양처리 1회는 최고분얼기에  $217 \text{ mg L}^{-1}$ 의  $\text{GeO}_2$  용액 150 mL를 토양표면에 주입하였고, 토양처리 2회는 최고분얼기 및 수잉기에 각각  $217 \text{ mg L}^{-1}$ 의  $\text{GeO}_2$  용액 75 mL씩을 주입하였으며, 토양처리 3회는 최고분얼기, 수잉기 및 출수기에 각각  $217 \text{ mg L}^{-1}$ 의  $\text{GeO}_2$  용액 50 mL씩을 주입하여 1, 2 및 3회 모두 주입된 최종 Ge 함량이  $8 \text{ mg kg}^{-1}$ 되게 처리하였다.

토양처리의 게르마늄 처리방법과 비료 시비방법은 상기 (1) 항의 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 구명과 동일하게 수행하였다.

#### ① 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 생육특성

게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 생육특성 조사는 벼 이앙 후, 최고분얼기, 수잉기 및 출수기에 벼의 품종별 초장, 분얼수 및 잎수를 각각 조사하였고, 쌀 수확 후에 수장, 간장, 천립중, 총립수, T/R율, 생체중량, 건조중량 및 수수를 각각 조사하였다.

#### ② 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 토양 중 무기성분 함량 변화

게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 토양 중 무기성분 함량 조사는 벼 수확 후 토양 중

T-N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub>, K, Ca, Mg 및 Na 함량을 각각 조사하였다.

③ 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성

㉓ 벼 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 벼 부위별 게르마늄 함량조사는 벼를 잎, 줄기 및 뿌리로 각각 나누어 각 부위별 게르마늄 함량을 조사하였다. 또한 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 상기 조사된 벼 부위별 게르마늄 함량에 건물중을 고려하여 게르마늄 흡수량을 계산하였다.

㉔ 쌀 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량조사는 쌀을 쌀겨, 현미 및 백미로 각각 나누어 각 부위별 게르마늄 함량을 조사하였다. 또한 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 상기 조사된 쌀 부위별 게르마늄 함량에 부위별 쌀 생산량을 고려하여 게르마늄 흡수량을 계산하였다.

㉕ 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율 비교

게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 게르마늄 주입량에 대한 품종별 잎, 줄기, 뿌리, 쌀겨, 현미 및 백미에 흡수된 게르마늄 흡수량의 비율을 조사하여 비교하였다.

④ 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 쌀 미질 특성

게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 쌀 미질 특성을 조사하기 위해 벼 수확 후 벼의 품종별 쌀의 심복백, 알카리붕괴도, 호화온도, 아밀로스, 단백질, 질소, 인 및 마그네슘 함량을 각각 조사하였다.

⑤ 최적 게르마늄 및 토양처리 횟수 선정

게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 게르마늄과 토양처리 횟수를 선정하기 위해 벼의 생육상황, 생산량, 게르마늄 저항성 및 쌀의 미질 등의 일반적인 특성과 부위별 게르마늄 흡수 특성을 전체적으로 비교하여 최적 게르마늄과 토양처리 횟수를 선정하였다.

다. 조사시기

게르마늄 함유 기능성 쌀의 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배법을 개발하기 위해 경상대학교 부속농장 유리온실에서 벼 재배 시험을 실시하였으며, 벼는 초장이 약 12 cm 정도인 어린 모를 2007년 6월 21일에 이앙하였다.

벼의 생육조사는 최고분얼기인 벼 이앙 후 15일 (2007년 7월 6일), 수잉기인 벼 이앙 후 45일 (2007년 8월 6일) 및 출수기인 벼 이앙 후 95일 (2007년 9월 14일)에 각 처리 조건별로 실

시하였으며, 조사항목은 초장, 분얼수 및 잎수를 각각 조사하였다.

벼의 수확은 벼 이앙 후 133일 (수확; 2007년 11월 1일)에 실시하였으며, 벼 수확 후 생육조사는 각 처리 조건별로 농촌진흥청 농작물 생육조사에 관한 규정에 의해 수장, 간장, 천립중, 총립수, T/R율, 생체중량, 건조중량 및 수수를 각각 조사하였다.

#### 라. 분석방법

토양의 토성분석은 비중계법을 이용하여 토양 무기질 입자 중 모래·미사·점토의 백분율을 산출하여 국제토양학회에서 제작한 삼각도표법을 이용하여 조사하였고, 토양의 화학성분 분석은 농촌진흥청 농업과학기술원의 토양 및 식물체분석법에 준하여 pH는 초자전극법, EC는 EC meter (Orion, Model 160, Germany)로 분석하였으며, 유기물은 Tyurin법, T-N은 Kjeldahl법, 유효인산은 Lancaster법, 유효규산은 NaOAc법, 치환성 양이온은 1N-Ammonium acetate (pH 7.0) 침출법으로 각각 분석하였다. 토양 중 게르마늄분석은 가용성 침출액으로 널리 사용되는 0.1N-HCl을 사용하여 30°C에서 1시간 침출하여 여과한 후 Inductively coupled plasma (ICP) spectrometer [Atomscan25 (TJA), OPTIMA 5300DV (Perkin elmer)]를 사용하였다.

식물체 분석을 위한 시료는 열풍건조기로 80°C에서 건조하여 40 mesh 이하로 분쇄한 후 사용하였다. 식물체 분석은 농업과학기술원의 토양 및 식물체분석법에 준하여 시료를 습식분해액으로 분해시킨 여액을 필요에 따라 희석하여 T-N은 Kjeldahl법, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>는 Vanado-molybdate법으로 분석하였으며, 무기성분은 Atomic absorption spectrophotometer (AA-SCAN8)로 분석하였으며, 게르마늄은 Inductively coupled plasma (ICP) spectrometer [Atomscan25 (TJA), OPTIMA 5300DV (PerkinElmer)] 및 ICP-MS로 분석하였다.

쌀 미질조사는 농촌진흥청 농사시험 연구조사 기준에 준하여 벼를 수확하여 탈곡한 후 실험실용 현미기를 이용하여 도정하였으며, 도정된 백미는 Cyclone sample mill을 이용하여 쌀가루로 분쇄한 후 100 mesh 체에 통과시켜 분석시료로 사용하였다. 아밀로스 함량은 요오드비색정량법으로 분석하였고, 단백질 함량은 쌀가루 0.4 g을 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액으로 습식분해시켜 Kjeldahl 증류법에 의해 조단백질 함량을 구한 후 단백질 환산계수 5.95를 곱하여 구하였으며, 심복백은 관능검사를 9단계로 나누어 분석하였고, 알카리붕괴도는 KOH 1.4%에서 24시간 침지 후 관능검사를 7단계로 나누어 분석하였으며, 질소 함량은 분해 후 Kjeldahl 증류법으로 하였고, 인 함량은 분해 후 Vanadate molybdate법으로 하였고, Mg 함량은 분해 후 Atomic absorption spectrophotometer (AA-SCAN8)로 분석하였다.

## 2. 결과 및 고찰

### 가. 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 구명

게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술 개발을 위한 최적 품종을 선정하기 위해 호평, 주남, 일미 및 동진벼의 4품종에서 게르마늄 무처리, 토양처리 및 엽면처리로 구분하여 벼 품종별 벼의 생육특성, 벼 품종별 토양 중 무기성분 함량 변화, 벼 품종에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성,

벼 품종에 따른 쌀 미질 특성을 각각 조사하였고, 이들 결과를 이용하여 최적 품종을 선정하였다.

(1) 벼 품종별 벼의 생육특성

벼 품종별 벼의 초장은 Fig. 2-18에서 보는 바와 같이 전반적으로 품종에 따라 별 차이 없었으며, 생육 30일 후인 수잉기 이후부터 모든 처리에서 벼의 성장이 둔화되기 시작하였다. 호평벼 및 동진벼의 초장은 타 품종에 비해 약간 큰 경향이었고, 게르마늄 독성으로 인해 게르마늄 무처리구내 벼의 초장은 게르마늄 처리구내 벼의 초장에 비해 약간 큰 경향이였다. 특히 게르마늄 엽면처리시 벼의 초장은 토양처리에 비해 약간 적었다.

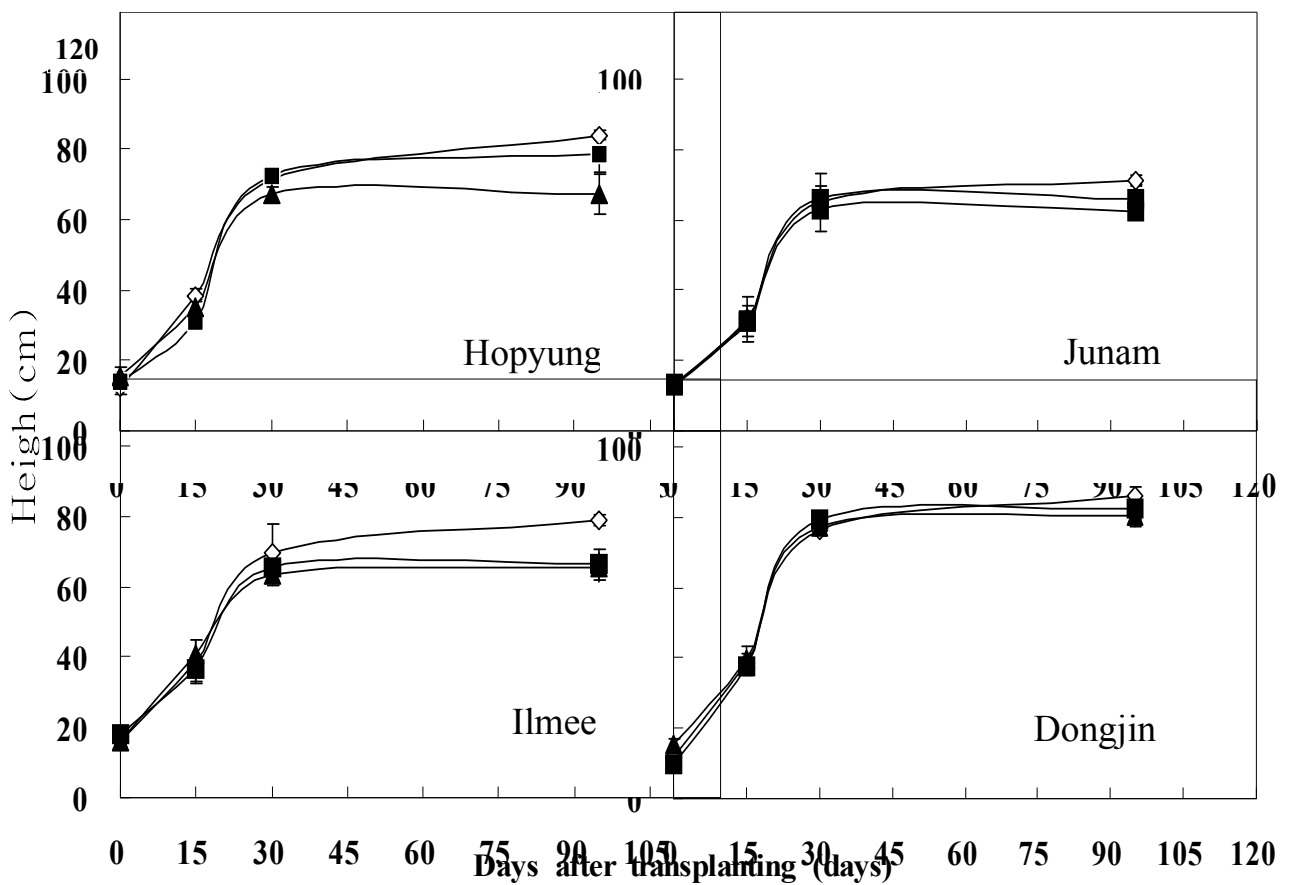


Fig. 2-18. 벼 품종에 따른 생육시기별 초장변화. Error bars represent SD (n = 6).

◇ : Control, ■ : Soil application, ▲ : Foliar spray.

벼 품종에 따른 벼의 생육시기별 잎수 및 분얼수는 Table 2-41~2-42와 같이 벼 품종에 따라서 별 차이 없이 비슷한 경향이였으며, 잎수는 수잉기까지 큰 폭으로 증가하다가 그 이후에는 증가폭이 점점 감소하였고, 분얼수는 전생육시기 동안 약간씩 증가하는 경향이였다.

Table 2-41. 벼 품종에 따른 생육시기별 잎수 변화

Rice	Treatment	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
		----- (ea pot <sup>-1</sup> ) -----			
Hopyung	Control	19.0±1.3	29.0±4.5	46.3±1.9	56.7±1.4
	Soil application	20.7±1.8	31.7±3.8	48.8±3.6	66.3±3.6
	Foliar spray	19.5±1.9	29.5±1.9	56.0±2.8	53.5±2.0
Junam	Control	19.2±1.4	27.2±3.4	46.0±2.7	59.0±7.5
	Soil application	20.0±1.6	30.0±4.6	47.3±2.6	55.8±2.4
	Foliar spray	19.8±1.7	27.8±1.2	50.3±5.0	57.7±4.3
Ilmee	Control	19.5±2.0	29.5±2.9	49.7±2.9	61.3±3.1
	Soil application	20.3±2.2	33.3±3.9	44.5±2.4	56.5±2.2
	Foliar spray	20.7±1.1	31.7±2.1	46.5±3.4	58.5±1.9
Dongjin	Control	20.3±1.6	29.0±3.1	48.3±6.1	58.3±3.8
	Soil application	19.8±0.9	28.5±3.5	50.0±4.5	55.8±5.9
	Foliar spray	19.6±1.1	27.3±2.9	52.5±6.6	54.5±5.1

Data represent mean ± SD (n = 6).

Table 2-42. 벼 품종에 따른 생육시기별 분얼수 변화

Rice	Treatment	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
		----- (ea pot <sup>-1</sup> ) -----			
Hopyung	Control	7.0±0.1	8.0±0.7	10.5±0.9	11.8±2.3
	Soil application	7.0±0.2	8.3±0.8	7.7±0.8	12.5±1.2
	Foliar spray	7.0±0.1	7.8±0.4	8.2±0.8	10.8±2.6
Junam	Control	7.0±0.4	7.7±0.5	7.3±1.0	13.0±2.1
	Soil application	7.0±0.4	7.7±0.8	7.8±1.1	13.7±1.0
	Foliar spray	7.0±0.4	7.3±0.8	8.5±1.9	11.2±2.6
Ilmee	Control	7.0±0.3	7.3±0.8	8.3±0.5	14.5±1.7
	Soil application	7.0±0.1	8.2±0.4	9.0±0.8	15.3±2.0
	Foliar spray	7.0±0.6	8.0±0.6	8.8±0.8	11.0±1.5
Dongjin	Control	7.0±0.3	8.2±0.7	9.8±1.2	16.0±2.0
	Soil application	7.0±0.2	8.2±0.4	9.0±0.8	16.7±1.1
	Foliar spray	7.0±0.3	8.0±0.8	8.7±0.6	12.3±2.1

Data represent mean ± SD (n = 6).

벼 품종에 따른 벼의 생육시기별 생육상황은 Photo. 2-7에서 보는 바와 같이 벼 이앙 초기부터 최고분얼기까지는 생육이 전반적으로 저조하였으며, 최고분얼기부터 수잉기까지 벼는 왕성하게 성장하였다. 벼의 생육은 호평벼가 타 품종에 비해 전반적으로 양호하였으며, 게르마늄 무처리구의 벼 생육은 게르마늄 처리구에 비해 왕성하였다. 또한 게르마늄 엽면처리시 벼의 생육은 토양처리에 비해 더욱 저조하였다.

또한 모든 벼 품종의 게르마늄 처리구에서는 출수기 때 게르마늄 독성으로 인해 잎에 갈색반점이 약간 관찰되었으나 심하지 않았다. 하지만 일미벼는 게르마늄 독성으로 인한 갈색반점이 타 품종에 비해 다소 많이 발생하였다. 이와 같이 엽면처리가 토양처리에 비해 생육이 저조한 것은 엽면처리는 토양처리와 달리 고농도의 게르마늄 용액을 잎에 직접 살포하여 이들 살포된 고농도의 게르마늄이 잎과 토양표면에 집적되어 벼에 독성을 일으키기 때문으로 판단된다.

따라서 품종별 벼의 게르마늄 독성범위는 호평벼가 타 품종에 비해 게르마늄에 대한 저항성이 우수하였으며, 전반적으로 게르마늄 엽면시비가 토양시비에 비해 게르마늄 독성이 심하였다. 또한 일미벼의 경우 타 품종에 비해 게르마늄 독성에 대한 저항성이 약간 낮은 것으로 판단되었다.



이앙직후 (6월21일)



최고분얼기 (7월6일)



수잉기 (8월6일)



출수기 (9월14일)

photo. 2-7. 벼 품종에 따른 생육시기별 생육상황.

수확 후 품종별 벼의 생육특성은 Table 2-43에서 보는 바와 같이 전반적으로 품종별 게르마늄 토양처리는 게르마늄 무처리구에 비해 비슷하거나 약간 적은 경향으로 게르마늄의 독성이 큰 영향을 미치지 못하였다. 하지만 엽면처리는 게르마늄 무처리나 토양처리에 비해 간장, 수장, 수수 및 천립중이 떨어져 수량이 감소되었다. 벼의 품종에 따른 쌀 생산량은 Fig. 2-25에서 보는 바와 같이 무처리구의 경우 호평 ≒ 주남 > 일미 ≫ 동진벼 순이었으며, 게르마늄 토양처리의 경우 호평 ≒ 주남 > 일미 ≫ 동진벼 순이었으며, 엽면처리의 경우 주남 > 일미 ≒ 호평 ≫ 동진벼 순이었다. 또한 쌀 생산량은 전반적으로 게르마늄 무처리 > 토양처리 > 엽면처리 순이었다.



Table 2-43. 벼의 품종에 따른 벼의 생육특성

Rice	Treatment	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	No. panicle per hill	No. grain per panicle	1,000 grain (g)	T/R ratio
Hopyung	Control	57.5±3.5	14.6±1.4	17.2±2.2	39.0± 5.6	23.8±0.1	2.6±0.6
	Soil application	49.0±3.1	13.3±2.0	16.0±3.8	36.8± 8.9	20.5±0.8	3.4±1.2
	Foliar spray	44.7±3.0	11.4±1.6	6.8±1.9	37.0±15.8	19.7±0.2	2.5±0.6
Junam	Control	50.9±2.2	11.4±0.6	16.5±2.9	32.8± 5.0	22.9±0.6	1.9±0.3
	Soil application	43.3±1.6	12.3±0.8	13.8±5.3	34.5±10.2	21.1±0.3	2.2±0.9
	Foliar spray	40.5±3.6	12.4±1.0	12.3±2.5	32.5± 8.7	21.2±0.7	2.1±1.4
Ilmee	Control	53.4±3.2	14.3±1.3	17.3±5.2	33.5± 5.6	23.1±0.5	2.8±0.5
	Soil application	49.3±3.6	11.7±1.2	20.2±3.7	29.1± 6.4	21.0±0.8	2.8±0.8
	Foliar spray	43.5±4.8	11.6±1.3	14.8±4.1	31.2± 7.5	21.5±0.7	2.4±0.9
Dongjin	Control	52.8±1.4	13.9±1.9	18.8±1.1	37.0±12.9	22.8±0.6	2.6±0.6
	Soil application	48.3±4.4	13.5±1.0	15.5±1.0	38.0±13.6	22.4±0.5	3.9±1.3
	Foliar spray	43.4±3.4	12.8±1.4	12.3±2.0	35.0±11.1	20.2±0.3	3.7±0.7

Data represent mean ± SD (n = 6).

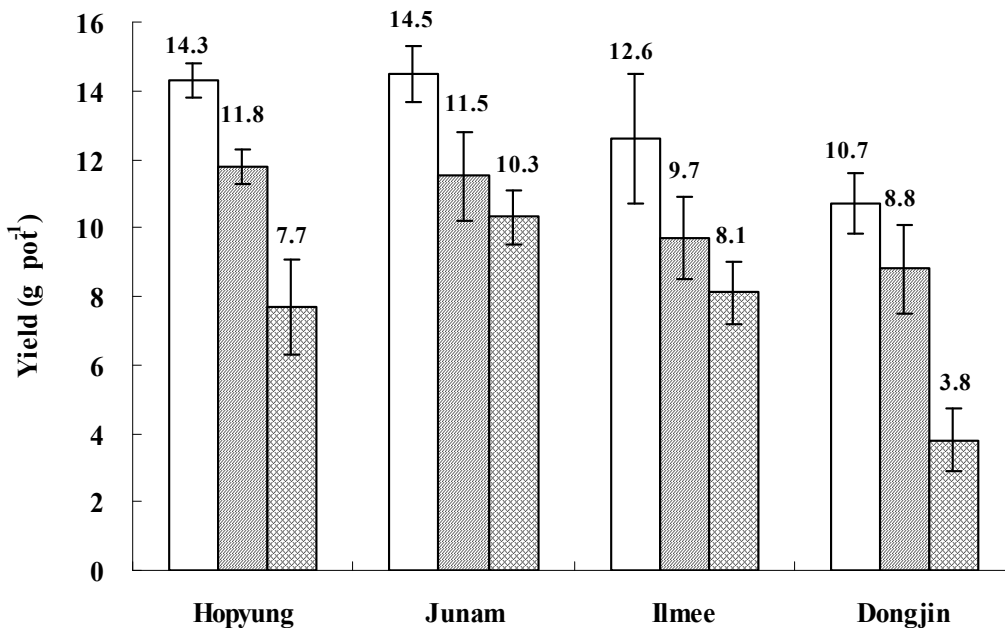


Fig. 2-19. 벼의 품종에 따른 벼의 생산량. Error bars represent SD (n = 6).

□ : Control,    ▨ : Soil application,    ▩ : Foliar spray.

(2) 벼 품종별 토양 중 무기성분 함량 변화

벼 수확 후 토양 중 무기성분 함량은 Table 2-44에서 보는 바와 같다. 벼 품종에 따른 토양 중 T-N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 및 SiO<sub>2</sub> 함량은 전반적으로 일미 > 동진 > 주남 > 호평벼 순으로 높았고, 게르마늄 처리방법에 따른 T-N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 및 SiO<sub>2</sub> 함량은 전반적으로 모든 품종에서 게르마늄 엽면처리 > 토양처리 > 무처리 순으로 벼의 생육상황과 상반된 결과를 보였다. 이와 같은 결과는 벼의 생육이 왕성할수록 벼의 생육에 필요한 토양 내 무기성분의 흡수 이용도가 증가하여 토양 내 무기성분의 함량 감소폭이 증가하기 때문으로 판단된다. 벼 품종에 따른 토양 중 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 벼의 품종 및 처리방법에 따라 전반적으로 별 차이 없었다.

Table 2-44. 벼 품종에 따른 토양 중 무기성분 함량

Rice	Treatment	T-N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Ex.Cat (cmol+ kg <sup>-1</sup> )			
		---- (mg kg <sup>-1</sup> ) ----			K	Ca	Mg	Na
	Control	309±15	510±15	154± 7	0.14±0.01	6.20±0.6	0.26±0.03	0.14±0.11
Hopyung	Soil application	312±28	514±21	157± 2	0.15±0.02	6.31±0.7	0.31±0.05	0.14±0.02
	Foliar spray	318±33	570±34	162± 7	0.17±0.05	6.34±0.2	0.34±0.04	0.13±0.03
	Control	324±37	462±30	156±12	0.14±0.02	6.18±0.5	0.32±0.02	0.12±0.01
Junam	Soil application	332±43	451±70	167±20	0.16±0.01	6.75±0.5	0.35±0.05	0.14±0.11
	Foliar spray	337±41	457±80	181±16	0.16±0.03	6.84±0.3	0.38±0.03	0.19±0.01
	Control	338±41	479±70	215±33	0.11±0.02	6.33±1.7	0.26±0.06	0.25±0.17
Ilmee	Soil application	397±34	415±35	214± 5	0.13±0.01	7.10±0.6	0.27±0.02	0.33±0.10
	Foliar spray	415±33	449±43	217±11	0.13±0.03	7.12±0.2	0.30±0.02	0.35±0.03
	Control	321±36	428±43	172± 9	0.14±0.02	6.68±0.4	0.24±0.02	0.14±0.13
Dongjin	Soil application	329±42	415±61	176± 8	0.17±0.02	7.10±0.5	0.26±0.02	0.15±0.09
	Foliar spray	337±44	417±32	181± 8	0.18±0.01	7.34±0.8	0.30±0.03	0.18±0.10

Data represent mean ± SD (n = 6).

(3) 벼 품종에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성

(가) 벼 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

① 잎

벼 품종에 따른 잎의 건물중량 및 게르마늄 함량은 Table 2-45에서 보는 바와 같다. 벼 품종별 잎의 건물중량은 전반적으로 게르마늄 무처리 > 토양처리 > 엽면처리 순이었다.

벼 품종별 잎 중 게르마늄 함량은 게르마늄 무처리의 경우 품종에 따라 별 차이 없이 1.0~1.7 mg kg<sup>-1</sup> 정도로 거의 검출되지 않았고, 토양처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 841, 622, 721 및 693 mg kg<sup>-1</sup>로 호평 > 일미 > 동진 > 주남벼 순이었으며, 엽면처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 1343, 1587, 913 및 723 mg kg<sup>-1</sup>로 주남 > 호평 > 일미 >

동진벼 순이었다.

처리방법에 따른 잎 중 게르마늄 함량은 전반적으로 엽면처리가 토양처리에 비해 약간 높게 나타났는데, 이는 엽면처리의 경우 게르마늄 용액을 잎 표면에 직접살포하기 때문으로 판단된다.

Table 2-45. 벼 품종에 따른 잎의 건물중량과 게르마늄 함량

Rice	Dry weight (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Control	Soil application	Foliar spray	Control	Soil application	Foliar spray
Hopyung	9.1±1.7	7.5±1.2	6.0±1.8	1.7±0.6	841.6±237.0	1343.2±227.6
Junam	7.8±0.4	6.9±1.7	6.4±1.0	1.0±0.5	622.2±208.5	1587.7±431.1
Ilmee	9.8±1.3	8.1±1.6	8.6±1.5	1.6±0.4	721.3±259.2	913.8±268.4
Dongjin	9.2±1.2	8.6±1.3	8.2±1.0	1.4±0.4	693.6±226.7	723.5±198.6

Data represent mean ± SD (n = 6).

벼 품종에 따른 잎의 게르마늄 흡수량은 Fig. 2-20에서 보는 바와 같이 게르마늄 무처리구의 경우 품종에 따라 별 차이 없이 8-16 µg pot<sup>-1</sup> 정도로 거의 흡수되지 않았고, 토양처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 6295, 4268, 5828 및 5993 µg pot<sup>-1</sup>로 호평 > 동진 > 일미 > 주남벼 순이었으며, 엽면처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 8086, 10130, 7895 및 5940 µg pot<sup>-1</sup>로 주남 > 호평 > 일미 > 동진벼 순이었다. 또한 처리방법에 따른 잎 중 게르마늄 흡수량은 전반적으로 엽면처리가 토양처리에 비해 약간 높은 경향이었고, 특히, 주남벼의 잎 중 게르마늄 흡수량은 엽면처리가 토양처리에 비해 매우 높았다.

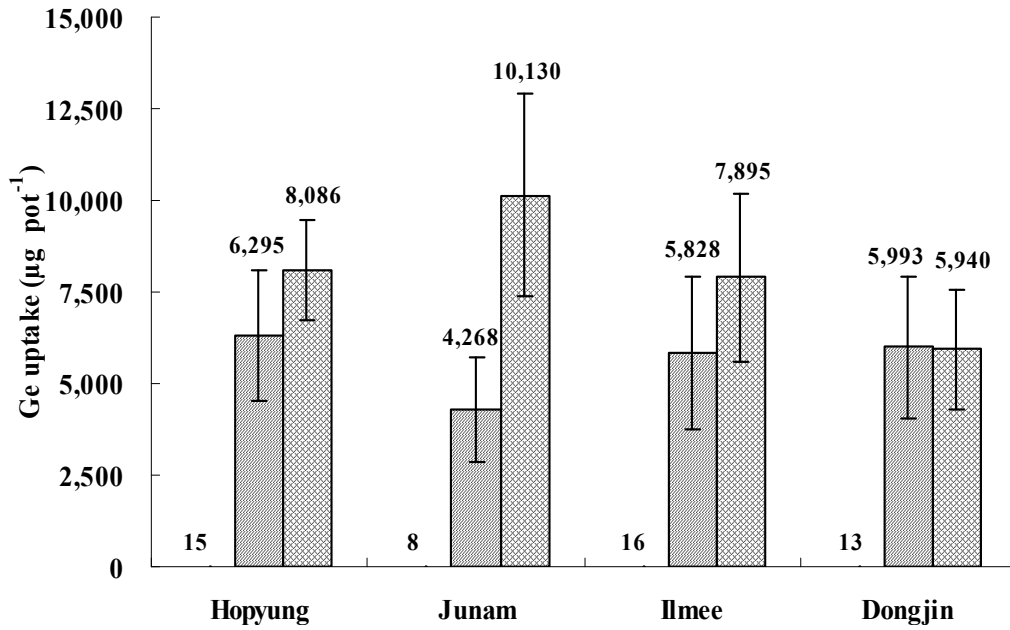


Fig. 2-20. 벼 품종에 따른 잎의 게르마늄 흡수량. Error bars represent SD (n = 6).

□ : Control,    ▨ : Soil application,    ▩ : Foliar spray.

## ② 줄기

벼 품종에 따른 줄기의 건물중량 및 게르마늄 함량은 Table 2-46에서 보는 바와 같다. 벼 품종별 줄기의 건물중량은 전반적으로 게르마늄 무처리 > 토양처리 > 엽면처리 순이었다.

줄기 중 게르마늄 함량은 게르마늄 무처리의 경우 품종에 따라 별 차이 없이 0.5~1.1 mg kg<sup>-1</sup> 정도로 거의 검출되지 않았고, 토양처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 137, 64, 118 및 103 mg kg<sup>-1</sup>로 호평 > 일미 > 동진 > 주남벼 순이었으며, 엽면처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 159, 122, 106 및 99 mg kg<sup>-1</sup>로 호평 > 주남 > 일미 > 동진벼 순이었다.

처리방법에 따른 줄기 중 게르마늄 함량은 전반적으로 엽면처리가 토양처리에 비해 약간 높게 나타났는데, 이는 엽면처리의 경우 게르마늄 용액을 잎과 줄기의 지상부에 직접살포하기 때문으로 판단된다.

Table 2-46. 벼 품종에 따른 줄기의 건물중량과 게르마늄 함량

Rice	Dry weight (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Control	Soil application	Foliar spray	Control	Soil application	Foliar spray
Hopyung	6.7±0.8	5.4±0.4	2.4±1.0	0.9±0.3	137.4±38.5	159.1±70.8
Junam	6.5±1.2	3.9±1.1	3.2±0.8	1.1±0.3	64.6±12.3	122.2±68.8
Ilmee	7.4±2.0	6.8±1.7	4.3±1.1	0.9±0.3	118.1±27.7	106.7±47.5
Dongjin	7.3±1.2	7.0±1.5	4.4±1.3	0.5±0.2	103.3±22.1	99.6±39.6

Data represent mean ± SD (n = 6).

벼 품종에 따른 줄기의 게르마늄 흡수량 (Fig. 2-21)은 게르마늄 무처리의 경우 품종에 따라 별 차이 없이 3.9-7.1 µg pot<sup>-1</sup> 정도 이었고, 토양처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 742, 253, 808 및 721 µg pot<sup>-1</sup>로 일미 > 호평 > 동진 > 주남벼 순이었으며, 엽면처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 374, 393, 463 및 433 µg pot<sup>-1</sup>로 일미 > 동진 > 주남 > 호평벼 순이었다. 또한 처리방법에 따른 줄기 중 게르마늄 함량은 전반적으로 토양처리가 엽면처리에 비해 약간 높은 경향이었으나, 주남벼의 경우 오히려 엽면처리에서 약간 높은 결과를 보였다.

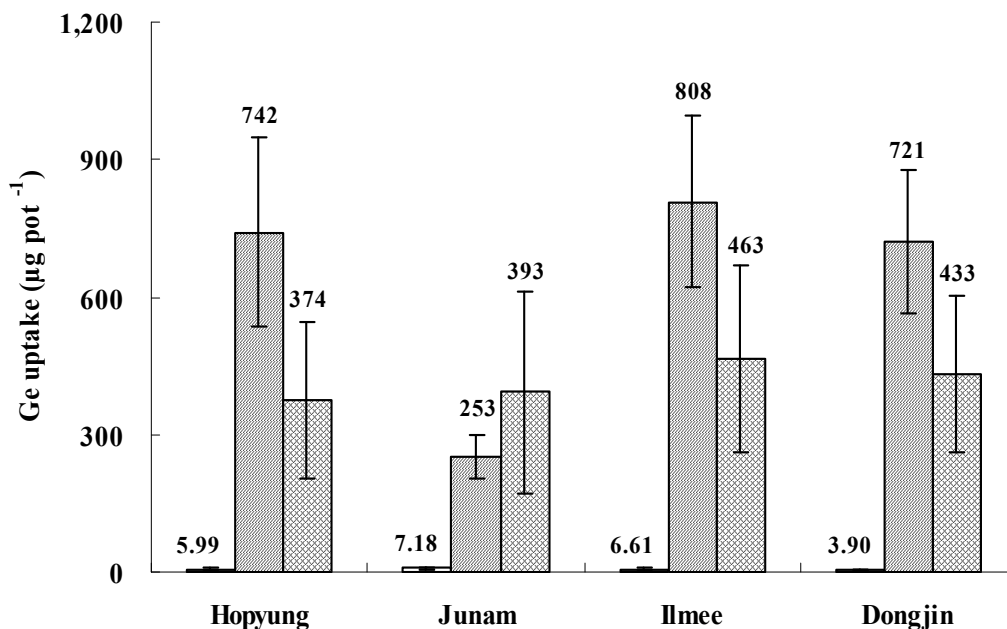


Fig. 2-21. 벼 품종에 따른 줄기의 게르마늄 흡수량. Error bars represent SD (n = 6).

□ : Control,    ▨ : Soil application,    ▩ : Foliar spray.

### ③ 뿌리

벼 품종별 뿌리의 건물중량 (Table 2-47)은 전반적으로 게르마늄 무처리 > 토양처리 > 엽면처리 순이었다. 벼 품종별 뿌리 중 게르마늄 함량은 Table 2-47과 같이 게르마늄 무처리의 경우 품종에 따라 별 차이 없이 0.3-0.7 mg kg<sup>-1</sup>정도로 거의 검출되지 않았고, 토양처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 2.3, 2.6, 2.3 및 3.1 mg kg<sup>-1</sup>로 동진 > 주남 > 일미 = 호평벼 순이었으며, 엽면처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 3.6, 4.6, 3.4 및 3.9 mg kg<sup>-1</sup>로 주남 > 동진 > 호평 > 일미벼 순이었다.

Table 2-47. 벼 품종에 따른 뿌리의 건물중량과 게르마늄 함량

Rice	Dry weight (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Control	Soil application	Foliar spray	Control	Soil application	Foliar spray
Hopyung	6.0±2.2	3.8±0.7	3.3±2.4	0.3±0.16	2.3±0.8	3.6±0.8
Junam	4.4±2.4	4.9±1.6	4.7±0.6	0.4±0.25	2.6±1.3	4.6±1.0
Ilmee	6.0±3.3	5.4±2.0	5.4±1.5	0.7±0.30	2.3±0.7	3.4±1.0
Dongjin	6.2±2.6	5.4±1.9	4.9±3.1	0.3±0.14	3.1±0.9	3.9±1.2

Data represent mean ± SD (n = 6).

벼 품종에 따른 뿌리의 게르마늄 흡수량은 Fig. 2-22에서 보는 바와 같이 게르마늄 무처리구의 경우 품종에 따라 별 차이 없이 1.7-3.9 µg pot<sup>-1</sup>정도로 거의 흡수되지 않았고, 토양처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 8.9, 12.8, 12.7 및 16.7 µg pot<sup>-1</sup>로 동진 > 주남 > 일미 > 호평벼 순이었으며, 엽면처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 12.1, 21.8, 18.4 및 19.5 µg pot<sup>-1</sup>로 주남 > 동진 > 일미 > 호평벼 순이었다. 또한 처리방법에 따른 뿌리 중 게르마늄 함량은 전반적으로 엽면처리가 토양처리에 비해 약간 높은 경향이였다.

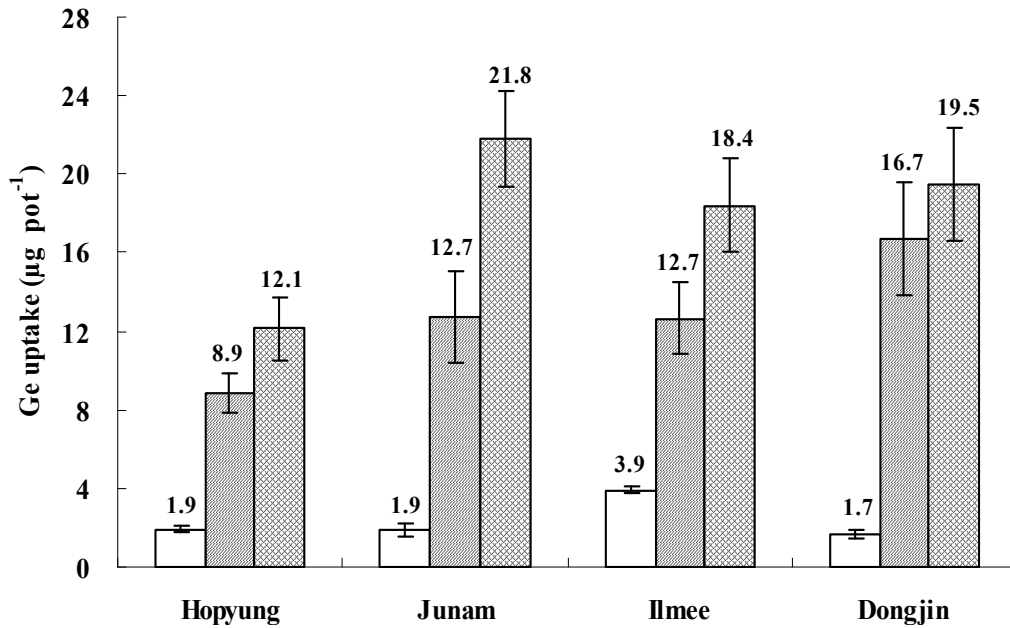


Fig. 2-22. 벼 품종에 따른 뿌리의 게르마늄 흡수량. Error bars represent SD (n = 6).

□ : Control,    ▨ : Soil application,    ▩ : Foliar spray.

(나) 쌀 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

① 쌀겨

벼 품종에 따른 쌀겨의 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-48에서 보는 바와 같다. 벼 품종별 쌀겨의 생산량은 전반적으로 게르마늄 무처리 ≥ 토양처리 ≥ 엽면처리 순이었으나, 전반적으로 큰 차이 없이 비슷하였다.

벼 품종별 쌀겨 중 게르마늄 함량은 게르마늄 무처리의 경우 품종에 따라 별 차이 없이 1.1 ~ 3.2 mg kg<sup>-1</sup> 정도로 거의 검출되지 않았고, 토양처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 457, 366, 349 및 384 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 엽면처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 548, 421, 281 및 402 mg kg<sup>-1</sup>로 토양 및 엽면처리 모두 호평벼가 가장 높은 함량을 보였다.

Table 2-48. 벼 품종에 따른 쌀겨의 생산량 및 게르마늄 함량

Rice	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Control	Soil application	Foliar spray	Control	Soil application	Foliar spray
Hopyung	2.6±0.1	2.1±0.1	1.4±0.2	3.2±2.0	457.2±29.8	548.2±28.1
Junam	2.6±0.2	2.1±0.2	1.9±0.2	3.0±0.8	366.4±17.6	421.0±19.5
Ilmee	2.3±0.3	1.8±0.2	1.5±0.2	1.5±0.1	349.9± 8.1	281.5±25.8
Dongjin	2.6±0.2	1.9±0.3	1.8±0.2	1.1±0.4	384.1±10.3	402.6±15.3

Data represent mean ± SD (n = 6).

벼 품종에 따른 쌀겨 중 게르마늄 흡수량 (Fig. 2-23)은 게르마늄 무처리의 경우 품종에 따라 별 차이 없이 2.7-8.3  $\mu\text{g pot}^{-1}$  정도로 거의 흡수되지 않았고, 토양처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 980, 765, 617 및 712  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 호평 > 주남 > 동진 > 일미벼 순이었으며, 엽면처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 767, 788, 414 및 717  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 주남  $\geq$  호평 > 동진 > 일미벼 순이었다. 또한 처리방법에 따른 쌀겨 중 게르마늄 흡수량은 전반적으로 토양처리가 엽면처리에 비해 약간 높은 경향이었고, 특히 호평벼와 일미벼의 쌀겨 중 게르마늄 흡수량은 토양처리가 엽면처리에 비해 약간 높았다.

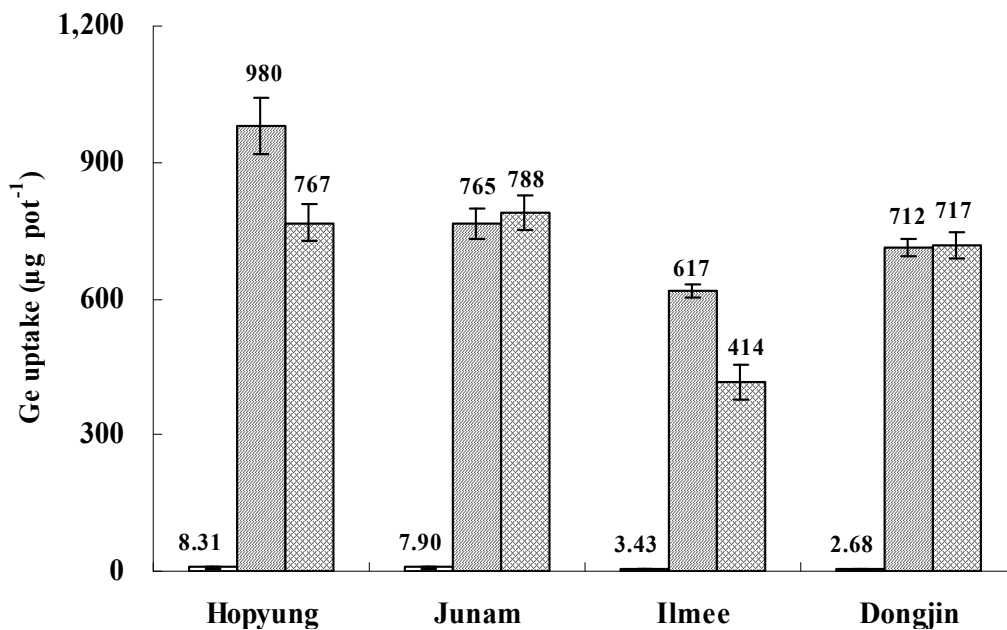


Fig. 2-23. 벼 품종에 따른 쌀겨의 게르마늄 흡수량. Error bars represent SD (n = 6).

□ : Control,    ▨ : Soil application,    ▩ : Foliar spray.

## ② 현미

벼 품종에 따른 현미의 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-49에서 보는 바와 같다. 벼 품종별 현미의 생산량은 전반적으로 게르마늄 무처리 > 토양처리 > 엽면처리 순이었다. 현미 중 게르마늄 함량은 게르마늄 무처리의 경우 품종에 따라 별 차이 없이 0.6-1.1  $\text{mg kg}^{-1}$  정도로 거의 검출되지 않았고, 토양처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 14.5, 8.0, 11.6 및 10.4  $\text{mg kg}^{-1}$ 로 호평 > 일미 > 동진 > 주남벼 순이었으며, 엽면처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 14.5, 11.8, 11.8 및 12.9  $\text{mg kg}^{-1}$ 로 호평 > 동진 > 주남  $\approx$  일미벼 순이었다.



Table 2-49. 벼 품종에 따른 현미의 생산량 및 게르마늄 함량

Rice	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Control	Soil application	Foliar spray	Control	Soil application	Foliar spray
Hopyung	11.7±0.4	9.7±0.4	6.3±0.4	0.8±0.2	14.5±1.4	14.5±1.2
Junam	11.9±0.7	9.4±1.1	8.4±0.7	0.6±0.3	8.0±1.2	11.8±2.6
Ilmee	10.3±1.5	7.9±1.0	6.6±0.7	1.1±0.3	11.6±3.2	11.8±3.6
Dongjin	11.5±0.6	8.3±1.1	8.0±0.8	0.6±0.3	10.4±2.6	12.9±2.8

Data represent mean ± SD (n = 6).

벼 품종에 따른 현미의 게르마늄 흡수량 (Fig. 2-24)은 게르마늄 무처리의 경우 품종에 따라 별 차이 없이 6.9-11.3  $\mu\text{g pot}^{-1}$  정도로 거의 게르마늄이 흡수되지 않았고, 토양처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 140, 75, 92 및 87  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 호평 > 일미 > 동진 > 주남벼 순이었으며, 엽면처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 91, 100, 78 및 103  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 동진 > 주남 > 호평 > 일미벼 순이었다. 또한 처리방법에 따른 현미 중 게르마늄 함량은 전반적으로 토양처리가 엽면처리에 비해 약간 높은 경향이었고, 특히 호평벼의 현미 중 게르마늄 함량은 토양처리가 엽면처리에 비해 매우 높았다.

따라서 현미 중 게르마늄 함량을 증가시키기 위해서는 게르마늄 엽면처리보다 토양처리가 바람직할 것으로 판단된다.

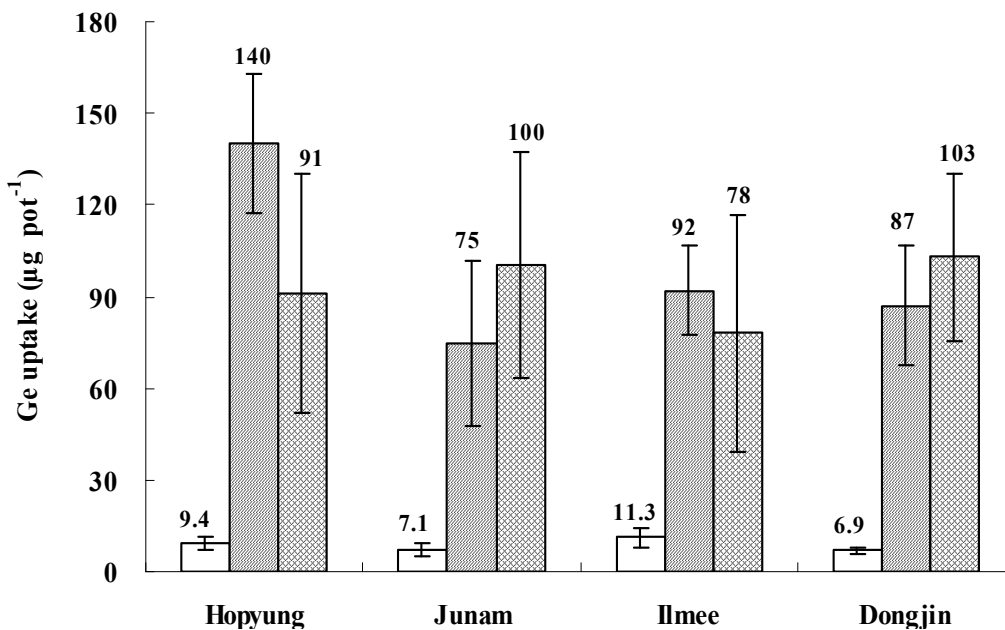


Fig. 2-24. 벼 품종에 따른 현미의 게르마늄 흡수량. Error bars represent SD (n = 6).

□ : Control,    ▨ : Soil application,    ▩ : Foliar spray.

### ③ 백미

벼 품종별 백미의 생산량은 Table 2-50에서 보는 바와 같이 전반적으로 게르마늄 무처리 > 토양처리 > 엽면처리 순이었다.

벼 품종별 백미 중 게르마늄 함량은 게르마늄 무처리의 경우 품종에 따라 별 차이 없이 0.3-0.5 mg kg<sup>-1</sup> 정도로 거의 검출되지 않았고, 토양처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 8.3, 6.5, 5.7 및 7.5 mg kg<sup>-1</sup>로 호평 > 동진 > 주남 > 일미벼 순이었으며, 엽면처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 11.6, 10.0, 3.5 및 9.3 mg kg<sup>-1</sup>로 호평 > 주남 > 동진 > 일미벼 순이었다 (Table 2-50).

Table 2-50. 벼 품종에 따른 백미의 생산량과 게르마늄 함량

Rice	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Control	Soil application	Foliar spray	Control	Soil application	Foliar spray
Hopyung	11.5±0.4	9.5±0.4	6.2±1.1	0.5±0.3	8.3±1.2	11.6±2.1
Junam	11.7±0.7	9.3±1.1	8.3±0.7	0.3±0.2	6.5±0.9	10.0±5.0
Ilmee	10.2±1.5	7.8±0.9	6.5±0.7	0.5±0.2	5.7±0.5	3.5±3.0
Dongjin	11.4±1.3	8.2±0.8	7.9±1.0	0.3±0.3	7.5±0.7	9.3±2.7

Data represent mean ± SD (n = 6).

벼 품종에 따른 백미의 게르마늄 흡수량은 Fig. 2-25과 같이 게르마늄 무처리의 경우 품종에 따라 별 차이 없이 3.1-5.8 µg pot<sup>-1</sup> 정도 이었고, 토양처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 79, 60, 45 및 62 µg pot<sup>-1</sup>로 호평 > 동진 > 주남 > 일미벼 순이었으며, 엽면처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 74, 71, 23 및 69 µg pot<sup>-1</sup>로 호평 > 주남 > 동진 > 일미벼 순이었다. 또한 처리방법에 따른 백미 중 게르마늄 흡수량은 호평과 일미벼의 경우 전반적으로 토양처리가 엽면처리에 비해 약간 높은 경향이었으나, 주남과 동진벼의 경우 오히려 엽면처리가 토양처리에 비해 약간 높은 경향이었다.

따라서 게르마늄 쌀 생산을 위한 품종은 호평벼가 가장 좋을 것으로 판단되며, 호평벼에서 백미 중 게르마늄 함량을 증가시키기 위해서는 게르마늄 엽면처리 보다 토양처리가 바람직할 것으로 사료된다.

이상의 결과에서 게르마늄은 쌀의 껍질에 많이 분포되는 것으로 보이며, 쌀겨와 쌀눈 등이 포함된 현미의 게르마늄 함량이 백미에 비해 약간 높았다. 따라서 쌀을 이용하여 게르마늄을 효과적으로 섭취하기 위해서는 도정공정을 줄인 현미가 좋을 것으로 판단된다.

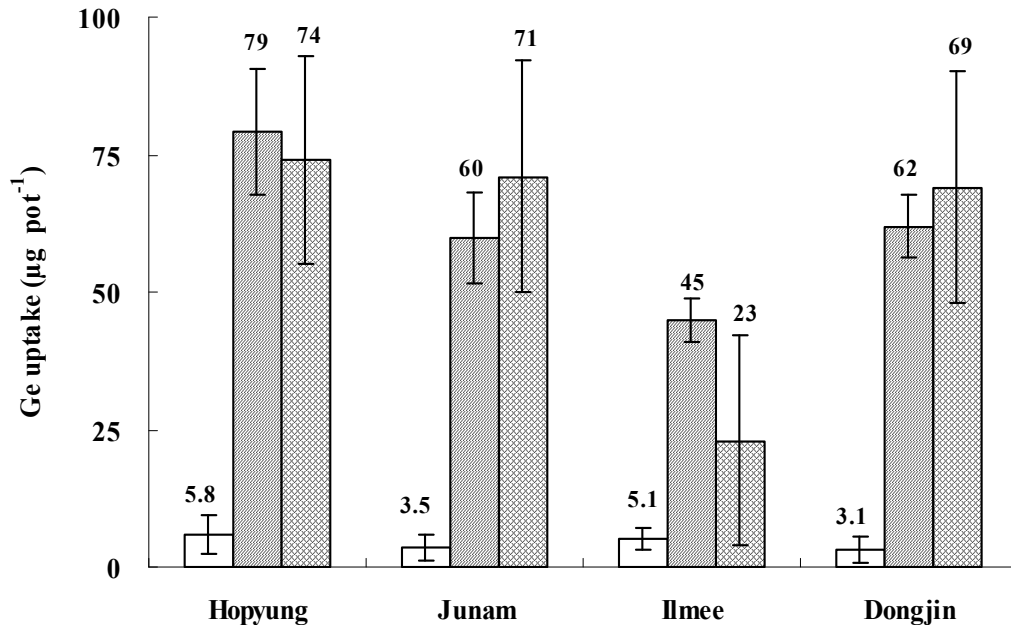


Fig. 2-25. 벼 품종에 따른 백미의 게르마늄 흡수량. Error bars represent SD (n = 6).

□ : Control,    ▨ : Soil application,    ▩ : Foliar spray.

#### ④ 쌀 부위별 게르마늄 흡수율

쌀 부위별 게르마늄 흡수율은 Fig. 2-26에서 보는 바와 같이 전반적으로 쌀겨 > 현미 > 백미 순으로 쌀겨가 다른 쌀 부위에 비해 가장 높은 게르마늄 흡수율을 보였다. 벼 품종별 쌀겨, 현미 및 백미의 게르마늄 흡수율은 쌀겨의 경우 호평 > 주남 ≒ 동진 > 일미 순이었고, 현미와 백미의 경우 호평 > 주남 ≒ 동진 > 일미 순이었다.

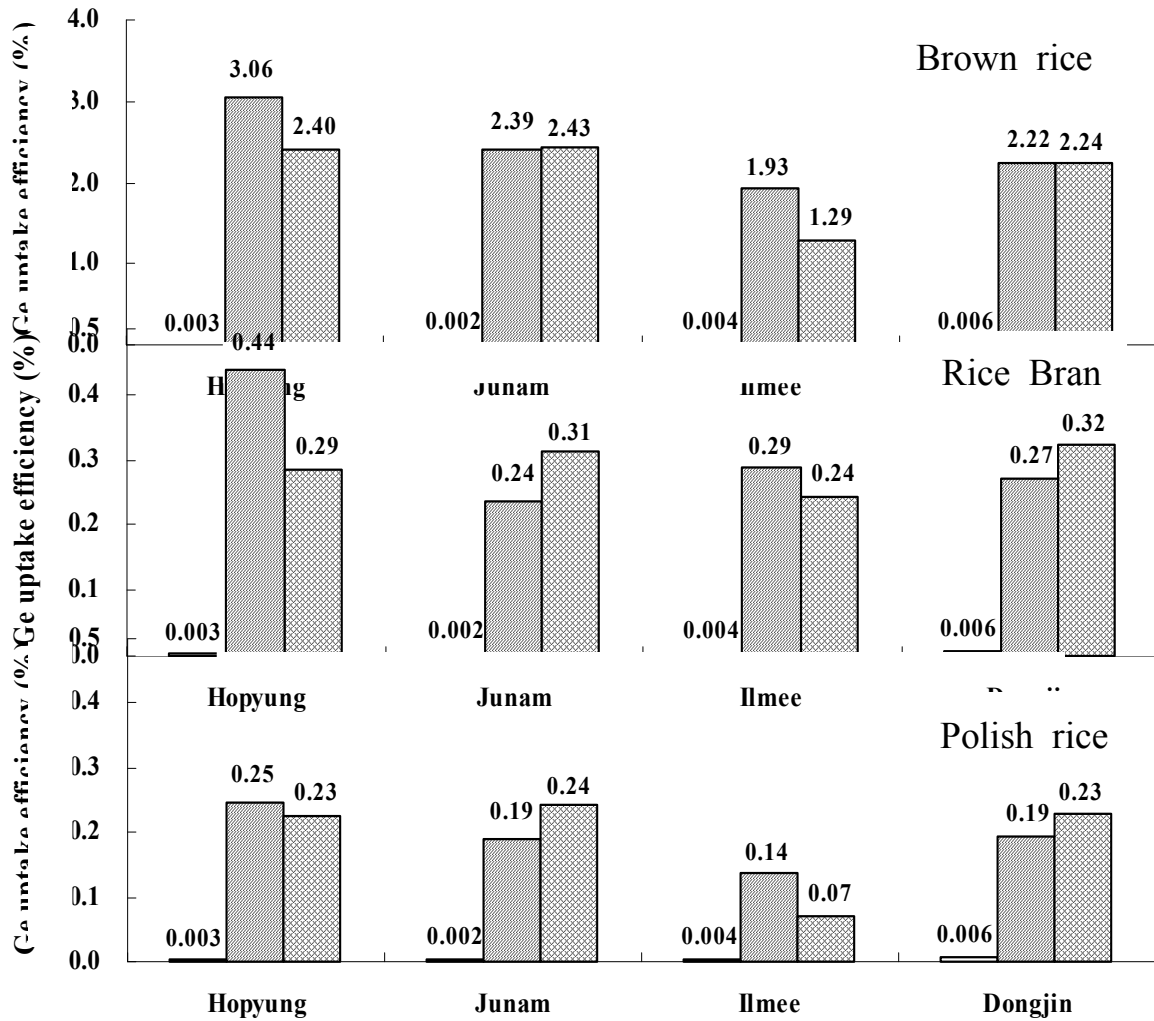


Fig. 2-26. 벼 품종에 따른 쌀 부위별 게르마늄 흡수율.

□ : Control, ▨ : Soil application, ▩ : Foliar spray.

(다) 벼 품종에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율 비교

벼 품종에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 Fig. 2-27~3-30에서 보는 바와 같이 총 게르마늄 주입량에 대한 벼 부위별 게르마늄 흡수량의 비율로 나타내었다.

호평벼에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 토양처리의 경우 잎이 19.7%, 줄기가 3.1%, 뿌리가 0.006%, 쌀겨가 2.3% 및 현미가 0.43% (백미 0.25%)로서 전체 게르마늄의 총 25.5%가 흡수되고 토양내에 74.5%의 게르마늄이 잔류하였으며, 엽면처리의 경우 잎이 25.3%, 줄기가 1.2%, 뿌리가 0.006%, 쌀겨가 2.4% 현미가 0.29% (백미 0.23%)로서 전체 게르마늄의 총 29.2%가 흡수되고 토양내에 70.8%의 게르마늄이 잔류하여 전반적인 게르마늄의 흡수율은 엽면처리가 토양처리에 비해 높았다. 이와 같이 전체 이용률 측면에서 엽면처리의 게르마늄 흡수율이 약간 높은 것은 고농도의 게르마늄 용액을 잎과 줄기에 정기적으로 살포함으로써 벼 표면에 흡착되거나 토양표면에 집적되어 검출되기 때문으로 판단된다. 하지만 벼 재배 후 실제 섭취하게 되는 현미나 백미 중의 게르마늄 흡수율은 토양처리가 엽면처리에 비해 거의 2배정도 높은 것으로 보아 토양처리가 엽면처리에 비해 효과적일 것으로 판단된다. 따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀

을 생산하기 위해서는 현미나 백미 중 게르마늄 흡수량을 증대시켜야 하므로 게르마늄 토양처리가 엽면처리에 비해 적합할 것으로 판단된다.

주남벼에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 토양처리의 경우 잎이 13.3%, 줄기가 0.8%, 뿌리가 0.004%, 쌀겨가 2.4% 현미가 0.23% (백미 0.19%)로서 전체 게르마늄의 총 16.8%가 흡수되고 토양내에 83.2%의 게르마늄이 잔류하였으며, 엽면처리의 경우 잎이 31.7%, 줄기가 1.2%, 뿌리가 0.007%, 쌀겨가 2.5% 현미가 0.44% (백미 0.31%)로서 전체 게르마늄의 총 35.7%가 흡수되고 토양내에 64.3%의 게르마늄이 잔류하여 전반적인 게르마늄의 흡수율은 엽면처리가 토양처리에 비해 높았다. 하지만 벼 재배 후 실제 섭취하게 되는 현미나 백미 중의 게르마늄 함량은 토양처리가 엽면처리에 비해 높았다.

일미벼에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 토양처리의 경우 잎이 18.2%, 줄기가 2.5%, 뿌리가 0.004%, 쌀겨가 1.9% 현미가 2.9% (백미 1.4%)로서 전체 게르마늄의 총 23.0%가 흡수되고 토양내에 77.0%의 게르마늄이 잔류하였으며, 엽면처리의 경우 잎이 24.7%, 줄기가 1.4%, 뿌리가 0.006%, 쌀겨가 1.3% 현미가 0.24% (백미 0.07%)로서 전체 게르마늄의 총 27.7%가 흡수되고 토양내에 72.3%의 게르마늄이 잔류하여 전반적인 게르마늄의 흡수율은 엽면처리가 토양처리에 비해 약간 높았다.

동진벼에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 토양처리의 경우 잎이 17.7%, 줄기가 2.3%, 뿌리가 0.005%, 쌀겨가 2.2% 현미가 0.27% (백미 0.19%)로서 전체 게르마늄의 총 22.5%가 흡수되고 토양내에 77.5%의 게르마늄이 잔류하였으며, 엽면처리의 경우 잎이 18.6%, 줄기가 1.4%, 뿌리가 0.006%, 쌀겨가 2.2% 현미가 0.31% (백미 0.23%)로서 전체 게르마늄의 22.5%가 흡수되고 토양내에 77.5%의 게르마늄이 잔류하여 전반적인 게르마늄의 흡수율은 엽면처리가 토양처리에 비해 높았다.

이상의 결과를 토대로 벼 품종별 게르마늄의 전체 이용률은 토양처리의 경우 호평 > 일미 > 동진 > 주남벼 순이었고, 엽면처리의 경우 호평 > 주남 > 일미 > 동진벼 순으로 두 조건 모두 호평벼가 최적 품종이었다.

**Soil application**

**Foliar spray**

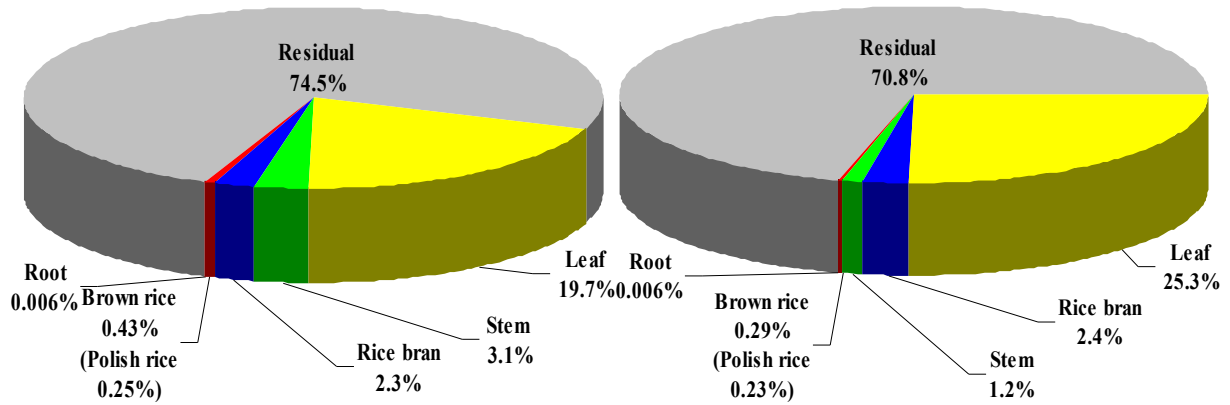


Fig. 2-27. 호평벼에서 토양처리와 엽면처리시 부위별 게르마늄 흡수율.

**Soil application**

**Foliar spray**

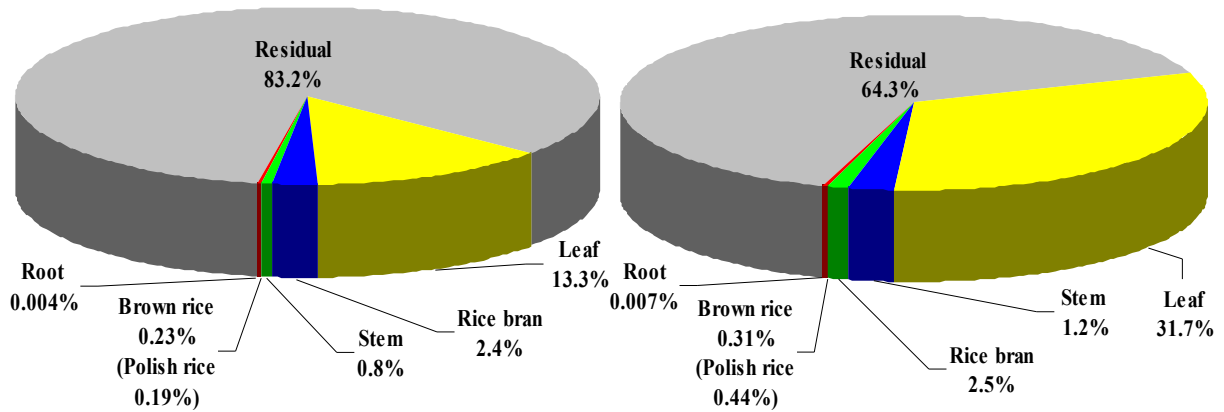


Fig. 2-28. 주남벼에서 토양처리와 엽면처리시 부위별 게르마늄 흡수율.

**Soil application**

**Foliar spray**

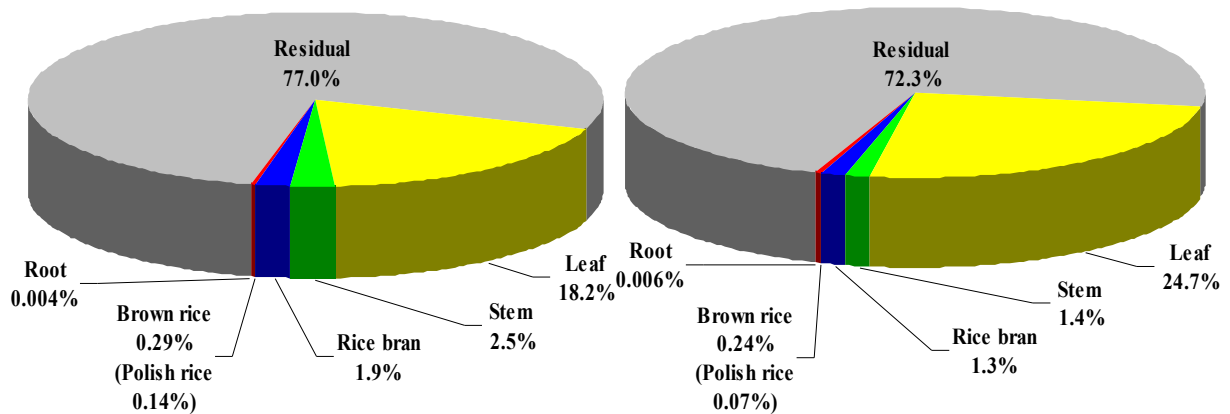


Fig. 2-29. 일미벼에서 토양처리와 엽면처리시 부위별 게르마늄 흡수율.

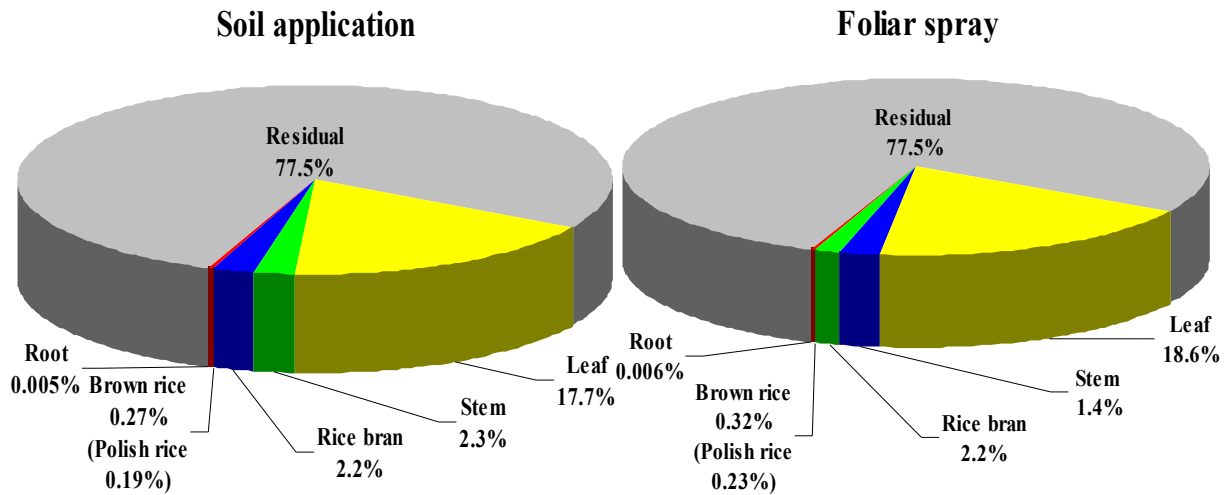


Fig. 2-30. 동진벼에서 토양처리와 엽면처리시 부위별 게르마늄 흡수율.

#### (4) 벼 품종에 따른 쌀 미질 특성

미질이란 쌀알의 화학적 물리적 성질을 종합하여 말하는 것으로 이에 대한 기호는 소비하는 민족과 지역에 따라 다르므로 그 기준을 만들기가 쉽지 않다. 그러나 일반적으로 양질미란 영양학적으로 우수하고 그 지역 소비자의 기호에 적합해야 할 것이어야 한다. 따라서 미질에는 여러 요인이 관여하는데, 대개 단백질 함량 특히 필수 아미노산이 많고, 아밀로스 함량이 적으며, 알칼리 붕괴도가 높고, 점성이 강하며, 색과 광택은 희고 윤기가 나며, 알이 둥글고 작으며, 호화온도가 낮아 밥 짓기가 쉽고, 밥을 지었을 때 기름기가 흐르며, 식미나 미각 등이 좋아야 한다. 그리고 복백 또는 심백이 있는 것은 좋지 않으며, 질소 함량은 낮을수록 좋고, 인과 마그네슘 함량은 높을수록 좋은 것으로 알려져 있다. 따라서 이들 기준에 준하여 벼 품종별 쌀의 미질 특성을 조사하였다.

벼 품종에 따른 쌀의 미질 특성을 조사한 결과 Table 2-51에서 보는 바와 같이 전반적으로 게르마늄 처리유무 및 처리방법에 따라 별 차이 없이 비슷한 경향이였다. 단백질 함량은 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 9.5-9.7, 9.1-9.9, 9.5-10.1 및 9.3-9.4%로 호평벼가 가장 높았고, Amylose 함량은 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 21.7-22.7, 22.2-24.6, 22.4-23.4 및 23.4-23.7%로 동진벼가 가장 높았다. 또한 알칼리붕괴도는 동진 > 호평 > 일미 > 주남 순으로 동진벼가 가장 좋았고, 모든 품종의 호화온도는 전반적으로 낮았으며, 벼 품종별 쌀의 심복백은 모든 품종에서 거의 없었다. 쌀 중 질소 함량은 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 1.59-1.63, 1.52-1.66, 1.59-1.70 및 1.59-1.63%로 일미벼가 가장 높았고, 쌀 중 인 함량은 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 112-115, 82-85, 64-66 및 74-76 eq로 호평벼가 가장 높았으며, 쌀 중 마그네슘 함량은 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 66-71, 35-44, 40-42 및 41-48 eq로 호평벼가 가장 높았다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 벼 품종에 따른 쌀의 미질은 게르마늄 처리유무와 처리방법에 따라 별 차이 없었으며, 전반적으로 호평벼가 타 품종에 비해 가장 좋은 미질을 보였다.

Table 2-51. 벼 품종에 따른 쌀의 미질 특성

Race	Treatment	WhiteCore	Alkiline	Gelatinization	Amylose	Protein	N	P	Mg
		& Velly (0-9)	degree (1-7)	temperature Low/High	Contents	Contents			
				-----		-----		--(eq)--	
						-----			
						-----			
	Control	0/1	4	Low	21.6	9.3	1.56	101.6	57.1
Hopyung	Soil application	0/1	5	Low	21.7	9.5	1.59	115.1	71.1
	Foliar spray	0/1	4	Low	22.7	9.7	1.63	112.4	66.0
	Control	0/1	4	Low	22.4	8.6	1.45	98.8	47.0
Junam	Soil application	0/1	4	Low	22.2	9.1	1.52	85.3	35.8
	Foliar spray	0/1	3	Low	24.6	9.9	1.66	82.5	44.0
	Control	0/1	5	Low	21.6	9.7	1.63	82.5	51.9
Ilmee	Soil application	0/1	5	Low	23.4	9.5	1.59	66.3	42.5
	Foliar spray	0/1	2	Low	22.4	10.1	1.70	64.0	40.2
	Control	0/1	4	Low	22.6	9.1	1.55	92.3	61.9
Dongjin	Soil application	0/1	5	Low	23.4	9.3	1.59	76.6	48.1
	Foliar spray	0/1	5	Low	23.7	9.4	1.63	74.1	41.2

## (5) 최적 품종 선정

벼 품종에 따른 게르마늄 토양처리 및 엽면처리 조건에서 벼의 생육특성, 토양 중 무기성분 함량 변화, 부위별 게르마늄 흡수 특성, 쌀 미질 특성을 각각 비교한 결과 전반적으로 토양처리가 엽면처리에 비해 효율적인 게르마늄 쌀을 생산할 수 있을 것으로 판단되었다. 따라서 게르마늄 토양처리 조건 하에서 최적 품종을 선정하기 위해 벼의 생육상황, 생산량, 게르마늄 저항성 및 쌀의 미질 등의 일반적인 특성과 게르마늄 흡수 특성을 전체적으로 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 2-31에서 보는 바와 같다.

게르마늄 토양처리 조건 하에서 벼 품종별 벼의 일반적인 특성을 비교한 결과 모든 품종에서 게르마늄 독성, 단백질, 아밀로스 및 알카리붕괴도 등은 별 차이 없었으나, 호평벼의 경우 생육상황, 천립중, 생산량 등에서 전반적으로 타 품종에 비해 좋았다. 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성을 비교한 결과 모든 품종에서 잎, 줄기 및 뿌리 중의 게르마늄 함량은 별 차이 없었으나, 호평벼의 경우 쌀겨, 현미, 백미 등에서 전반적으로 타 품종에 비해 높은 게르마늄 함량 및 흡수량을 보였다.

이상의 여러 요인을 종합적으로 고려한 결과 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 품종은 호평벼이었다. 특히 호평벼는 쌀의 생산량과 게르마늄 흡수량이 모두 높았다. 따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀을 효과적으로 생산하기 위해서는 호평벼를 재배하여야 할 것으로 판단된다.



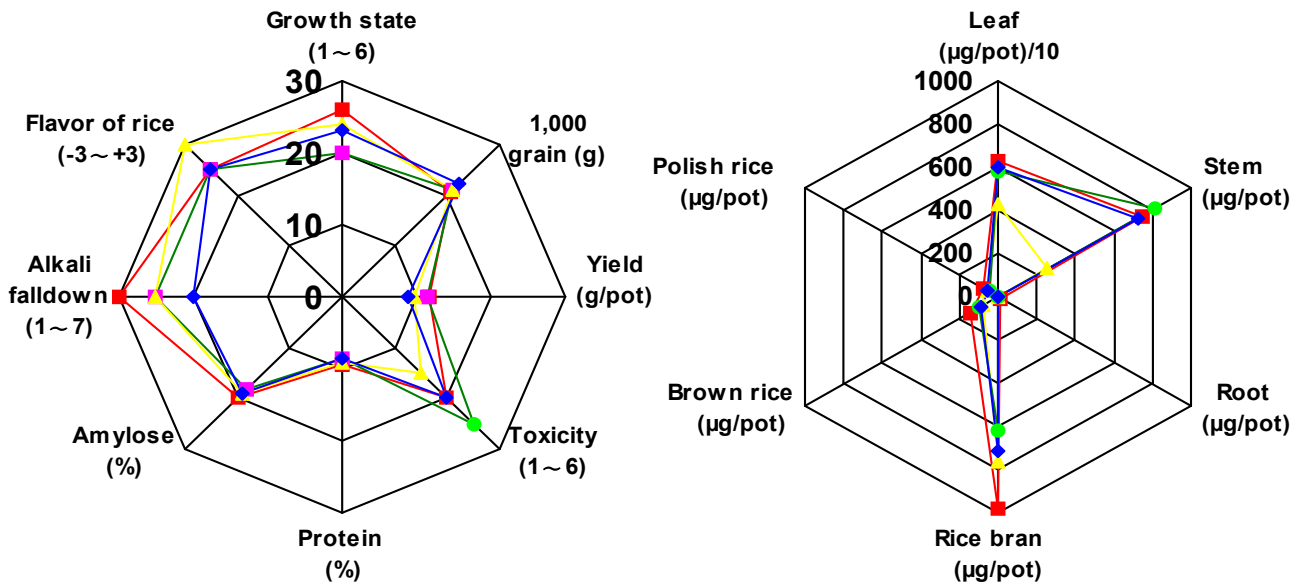


Fig. 2-31. 벼 품종에 따른 벼의 일반적인 특성과 게르마늄 흡수특성.

■ : Hopyung, ▲ : Junam, ● : Ilmee, ◆ : Dongjin.

나. 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배조건 구명

(1) 토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성 구명

게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술 개발을 위한 최적 토성을 선정하기 위해 상기 1. 항의 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 조사결과 최적 품종인 호평벼에서 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토의 4종류 토성으로 구분하여 동일한 게르마늄을 토양에 처리한 후 토성별 벼의 생육특성, 토성별 토양 중 무기성분 함량 변화, 토성에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성 및 토성에 다른 쌀 미질 특성을 각각 조사하였고, 이들 결과를 이용하여 최적 토성을 선정하였다.

(가) 토성별 벼의 생육특성

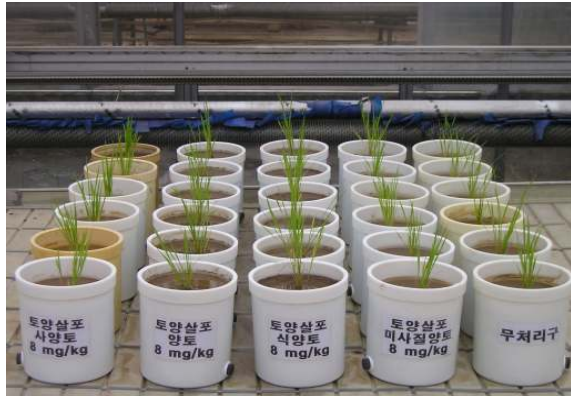
토성별 벼의 생육특성은 Table 2-52에서 보는 바와 같이 토성별 벼의 초장은 토성에 따라 별 차이 없었으며, 전반적으로 생육시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향으로 특히 최대분얼기 이후에 급격히 증가하는 경향이였다. 토성별 벼의 잎수는 전반적으로 토성에 따라 별 차이 없었으며, 생육시기가 경과함에 따라 점점 증가하는 경향이였고, 분얼수도 잎수와 비슷한 경향으로 토성에 따라 별 차이 없었다.

Table 2-52. 토성에 따른 벼의 생육시기별 초장, 잎수 및 분얼수 변화

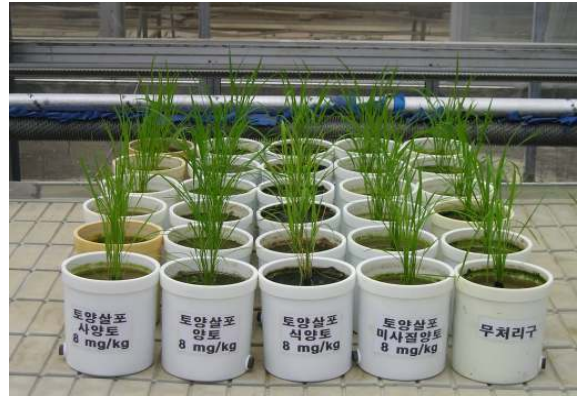
Item	Soil texture	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
		-----( $\text{ea pot}^{-1}$ )-----			
Plant length	Silt loam	15.1±1.9	30.8±3.7	72.5±2.1	78.8±3.9
	Clay loam	16.2±2.4	34.6±3.3	75.2±3.6	80.7±4.1
	Loam	16.1±1.4	32.0±5.7	73.8±6.0	79.3±5.6
	Sandy loam	16.4±1.1	34.7±2.6	71.8±1.9	76.5±3.0
No. leaf	Silt loam	19.0±2.3	31.7±3.8	48.8±3.6	66.3±3.6
	Clay loam	23.3±2.1	36.3±4.5	45.2±3.6	69.8±6.1
	Loam	19.3±3.1	23.2±7.9	57.3±5.0	62.7±4.4
	Sandy loam	18.2±2.2	32.2±2.5	63.5±6.2	67.3±5.5
No. tiller	Silt loam	7.0±0.1	8.3±0.8	7.7±0.8	12.5±1.2
	Clay loam	7.0±0.1	9.2±1.5	10.5±1.3	14.7±2.9
	Loam	7.0±0.3	7.2±1.3	11.5±1.6	15.5±2.1
	Sandy loam	7.0±0.6	8.5±1.0	11.3±1.9	13.5±1.1

Data represent mean ± SD (n = 6).

토성에 따른 생육시기별 생육상황은 Photo. 2-8에서 보는 바와 같이 토성에 따라 별 차이 없었으며, 모든 토성에서 출수기에 게르마늄 독성으로 인해 잎 표면에 갈색 반점이 약간 나타났으나 심하지 않았다. 수확 후 토성별 벼의 생육특성은 Table 2-52에서 보는 바와 같이 식양토가 다른 토성에 비해 간장, 수장, 수수 및 천립중 등의 생육특성이 약간 좋았다. 토성별 쌀 생산량은 Fig. 2-32에서 보는 바와 같이 미사질양토에서  $11.8 \text{ g pot}^{-1}$ 로 다른 토성에 비해 가장 높은 결과를 보였으며, 전반적으로 미사질양토 > 식양토 > 양토 > 사양토 순이었다.



이양직후 (6월21일)



최고분얼기 (7월6일)



수잉기 (8월6일)



출수기 (9월14일)

Photo. 2-8. 토성에 따른 벼의 생육시기별 생육상황.

Table 2-52. 토성에 따른 벼의 생육특성

Soil texture	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	No. panicle per hill	No. grain per panicle	1,000 grain (g)	T/R ratio
Silt loam	44.0±3.1	13.3±2.0	16.0±3.8	36.8±8.9	20.5±0.8	3.4±1.2
Clay loam	52.9±5.6	14.7±1.9	16.2±4.7	37.7±9.1	21.6±0.3	3.9±0.9
Loam	48.2±4.3	12.5±1.2	15.2±4.6	33.7±6.4	20.9±0.5	3.1±1.2
Sandy loam	51.3±4.9	13.1±1.3	14.8±3.4	33.5±2.3	20.4±0.1	2.8±1.7

Data represent mean ± SD (n = 6).

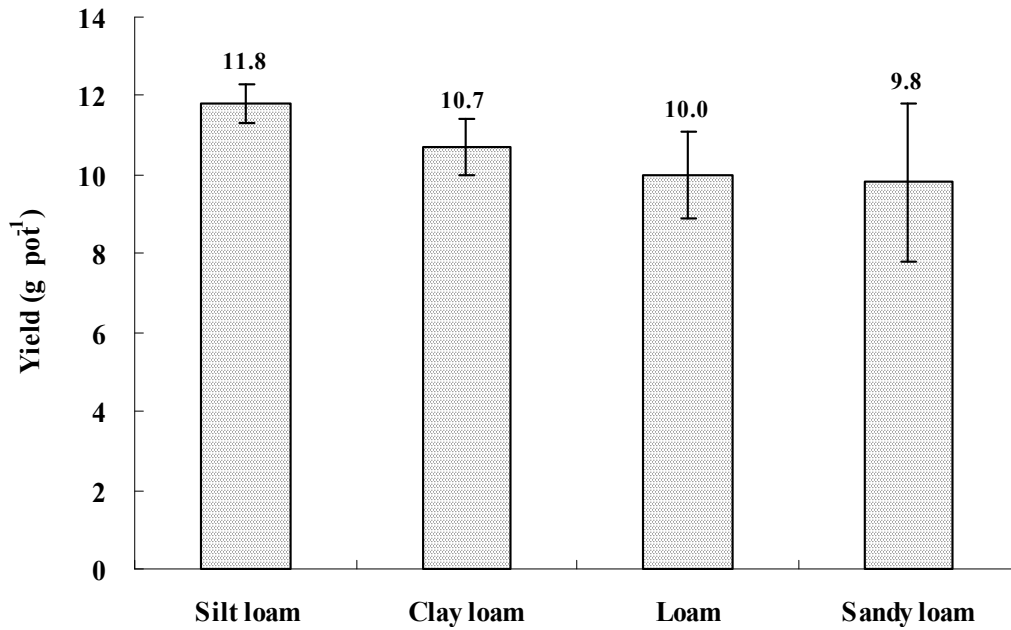


Fig. 2-32. 토성에 따른 쌀의 생산량. Error bars represent SD (n = 6).

(나) 토성별 토양 중 무기성분 함량 변화

벼 수확 후 토성별 토양 중 무기성분 함량은 Table 2-53에서 보는 바와 같이 토성에 따라 별 차이 없었으며, 식양토가 다른 토성에 비해 T-N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub> 함량이 미미하게 높았다. 토성에 따른 토양 중 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 양토 및 사양토가 미사질양토와 식양토에 비해 전반적으로 약간 높은 함량을 나타내었다. 이들 성분의 차이는 공시 토양 자체의 무기성분 차이로 인한 결과로 사료되며, 전반적인 함량 변화는 큰 차이 없었다.

Table 2-53. 토성별 토양 중 무기성분 함량

Soil texture	T-N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Ex.Cat (cmol+ kg <sup>-1</sup> )			
	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----			K	Ca	Mg	Na
Silt loam	402± 28	510± 51	157± 2	0.14±0.02	6.2±0.1	0.31±0.05	0.14±0.02
Clay loam	1960± 74	5389±235	476±29	0.11±0.01	7.1±0.3	0.58±0.03	0.10±0.01
Loam	1144±103	1250± 16	368± 9	0.69±0.51	11.5±1.5	1.54±0.14	0.26±0.11
Sandy loam	284± 21	442± 20	166±10	1.48±0.48	14.2±1.9	1.82±0.24	0.38±0.04

Data represent mean ± SD (n = 6).

(다) 토성에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성

① 벼 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

토성에 따른 벼 부위별 건물중량은 Table 2-51에서 보는 바와 같이 전반적으로 잎 > 줄기 > 뿌리 순으로 높았다. 토성에 따른 게르마늄 함량은 잎의 경우 미사질양토, 식양토, 양토 및

사양토가 각각 841, 796, 604 및 627 mg kg<sup>-1</sup>로 미사질양토 > 식양토 > 사양토 > 양토 순이었으며, 줄기의 경우 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토가 각각 137, 118, 107 및 114 mg kg<sup>-1</sup>로 미사질양토 > 식양토 > 사양토 > 양토 순이었으며, 뿌리의 경우 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토가 각각 2.3, 2.1, 1.9 및 2.2 mg kg<sup>-1</sup>로 미사질양토 > 사양토 > 식양토 > 양토 순이었다 (Table 2-54). 전반적으로 미사질양토에 이양된 벼가 잎, 줄기 및 뿌리에서 게르마늄 함량이 미미하게 높았다. 따라서 미사질양토가 게르마늄 흡수에 용이한 토양으로 판단된다.

Table 2-54. 토성에 따른 벼의 건물중량과 게르마늄 함량

Soil texture	Dry weight (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
Silt loam	7.5±1.2	5.4±0.4	3.8±0.7	841.6±37.0	137.4±38.5	2.3±0.8
Clay loam	11.7±1.0	7.5±2.7	4.9±2.1	796.2±40.6	118.6±32.2	2.1±0.6
Loam	13.0±2.6	7.3±1.5	6.6±1.7	604.4±38.2	107.3±20.8	1.9±0.3
Sandy loam	9.3±1.8	6.0±1.1	5.5±0.8	627.2±38.2	114.8±20.1	2.2±0.4

Data represent mean ± SD (n = 6).

벼 품종에 따른 게르마늄 흡수량은 Fig. 2-33에서 보는 바와 같이 잎의 경우 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토가 각각 6295, 5695, 6665 및 4288 µg pot<sup>-1</sup>로 양토와 미사질양토가 다른 토성에 비해 높았으며, 줄기의 경우 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토가 각각 724, 445, 499 및 335 µg pot<sup>-1</sup>로 미사질양토가 다른 토성에 비해 가장 높았으며, 뿌리의 경우 모든 토성에서 별 차이 없이 8.9~13.1 µg pot<sup>-1</sup>범위이었다.

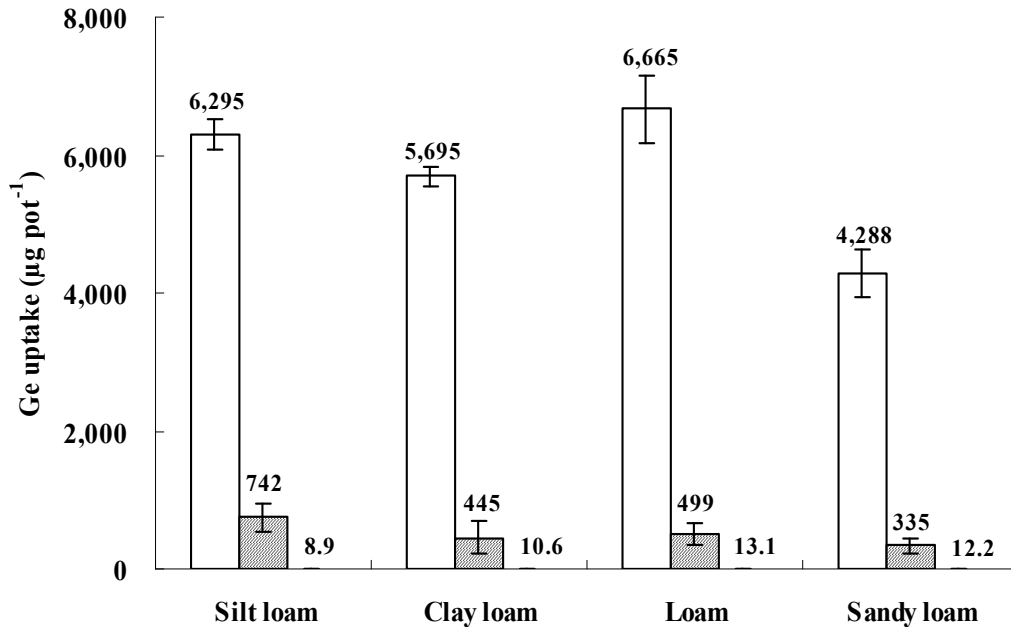


Fig. 2-33. 토성에 따른 벼의 흡수량. Error bars represent SD (n = 6).

□ : Leaf,    ▨ : Stem,    ▩ : Root.

## ② 쌀 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

토성에 따른 쌀 부위별 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-55에서 보는 바와 같다. 토성별 쌀의 생산량은 전반적으로 토성에 따라 별 차이 없이 현미 > 백미 > 쌀겨 순으로 높았다. 토성에 따른 게르마늄 함량은 쌀겨의 경우 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토가 각각 457, 476, 415 및 451 mg kg<sup>-1</sup>로 모든 토성에서 비슷한 결과를 보였으며, 현미의 경우 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토가 각각 14.5, 13.2, 12.8 및 14.1 mg kg<sup>-1</sup>로 미사질양토가 다른 토성에 비해 가장 높은 결과를 보였고, 백미의 경우 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토가 각각 8.3, 5.1, 4.7 및 5.3 mg kg<sup>-1</sup>로 현미와 비슷한 경향으로 미사질양토가 다른 토성에 비해 가장 높은 결과를 보였다. 따라서 쌀에 흡수된 게르마늄은 대부분 쌀 껍질에 분포되어 있었고, 쌀겨와 쌀눈 등이 포함된 현미의 게르마늄 함량은 전반적으로 백미에 비해 높았다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 게르마늄이 함유된 쌀을 효과적으로 섭취하기 위해서는 도정공정을 줄인 현미가 백미보다 좋을 것으로 판단되며, 효과적으로 벼에 흡수된 유기게르마늄을 섭취하기 위해서는 게르마늄이 많이 함유된 쌀겨를 가공식품 등에 활용할 수 있는 방안이 필요할 것으로 사료된다.

Table 2-55. 토성에 따른 쌀의 생산량과 게르마늄 함량

Soil texture	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
Silt loam	2.1±0.1	9.7±0.4	9.5±0.4	457.2±29.8	14.5±1.4	8.3±1.2
Clay loam	1.9±0.1	8.8±0.6	8.6±0.6	476.6±13.8	13.2±5.1	5.1±1.1
Loam	1.8±0.2	8.2±0.9	8.1±0.9	415.3±11.1	12.8±0.9	4.7±1.1
Sandy loam	1.8±0.4	8.0±1.6	7.9±1.6	451.0± 9.2	14.1±0.5	5.3±0.3

Data represent mean ± SD (n = 6).

토성에 따른 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 Fig. 2-34에서 보는 바와 같이 쌀겨의 경우 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토가 각각 980, 868, 754 및 803  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 미사질양토가 다른 토성에 비해 가장 높았으며, 현미의 경우 전반적으로 미사질양토 > 사양토 > 식양토 > 양토 순으로 미사질양토가 140  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 백미의 경우 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토가 각각 79, 44, 38 및 42  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 현미와 비슷한 경향이였다.

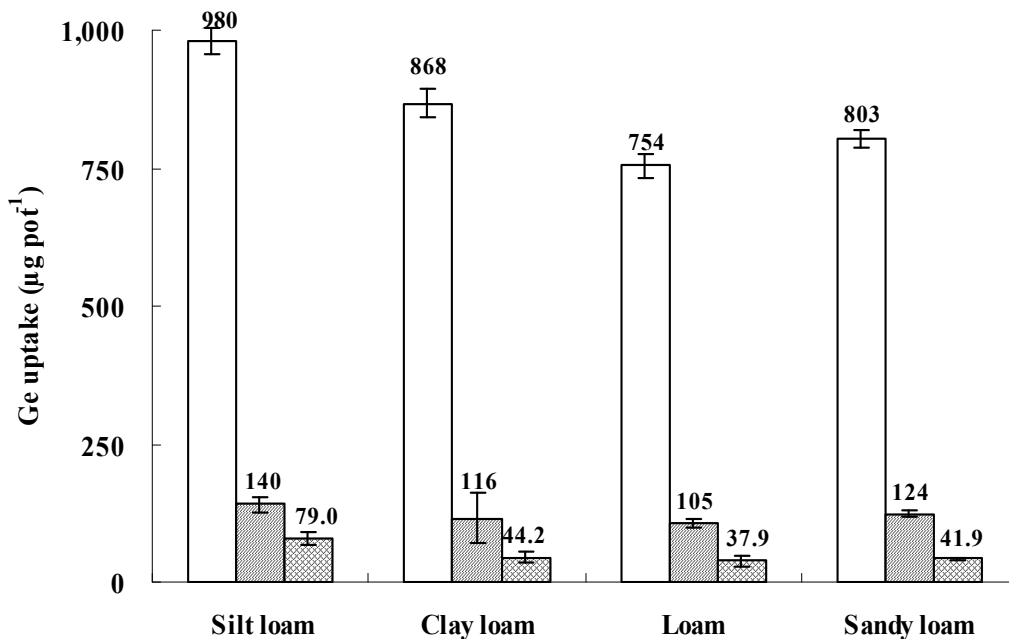


Fig. 2-34. 토성에 따른 쌀의 부위별 게르마늄 흡수량. Error bars represent SD (n = 6).

□ : Rice bran,    ▨ : Brown rice,    ▩ : Polished rice.

### ③ 토성에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율 비교

토성에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 Fig. 2-35에서 보는 바와 같다. 미사질양토에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 잎이 19.7%, 줄기가 2.3%, 뿌리가 0.03%, 쌀겨가 3.1% 및 현미

가 0.44% (백미 0.25%)로서 총 게르마늄의 25.8%가 흡수되고 토양 내에 74.2%의 게르마늄이 잔류하였다. 식양토에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 잎이 29.1%, 줄기가 2.7%, 뿌리가 0.03%, 쌀겨가 2.7% 현미가 0.36% (백미 0.13%)로서 총 게르마늄의 35.2%가 흡수되고 토양 내에 64.8%의 게르마늄이 잔류하였다. 양토에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 잎이 24.6%, 줄기가 2.4%, 뿌리가 0.04%, 쌀겨가 2.4% 현미가 0.33% (백미 0.12%)로서 총 게르마늄의 29.8%가 흡수되고 토양 내에 70.2%의 게르마늄이 잔류하였다. 사양토에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 잎이 18.2%, 줄기가 2.2%, 뿌리가 0.04%, 쌀겨가 2.5% 현미가 0.39% (백미 0.13%)로서 총 게르마늄의 23.4%가 흡수되고 토양 내에 76.6%의 게르마늄이 잔류하였다.

이상의 결과를 토대로 토성에 따른 벼의 게르마늄 총 이용률은 전반적으로 식양토 > 양토 > 미사질양토 > 사양토 순으로 식양토에서 가장 높았다. 하지만 벼 재배 후 실제 섭취하게 되는 현미나 백미 중의 게르마늄 흡수율은 미사질양토가 다른 토성에 비해 가장 높았다.

따라서 쌀에 효과적으로 게르마늄을 흡수시키기 위한 최적 토성은 미사질양토이었다.

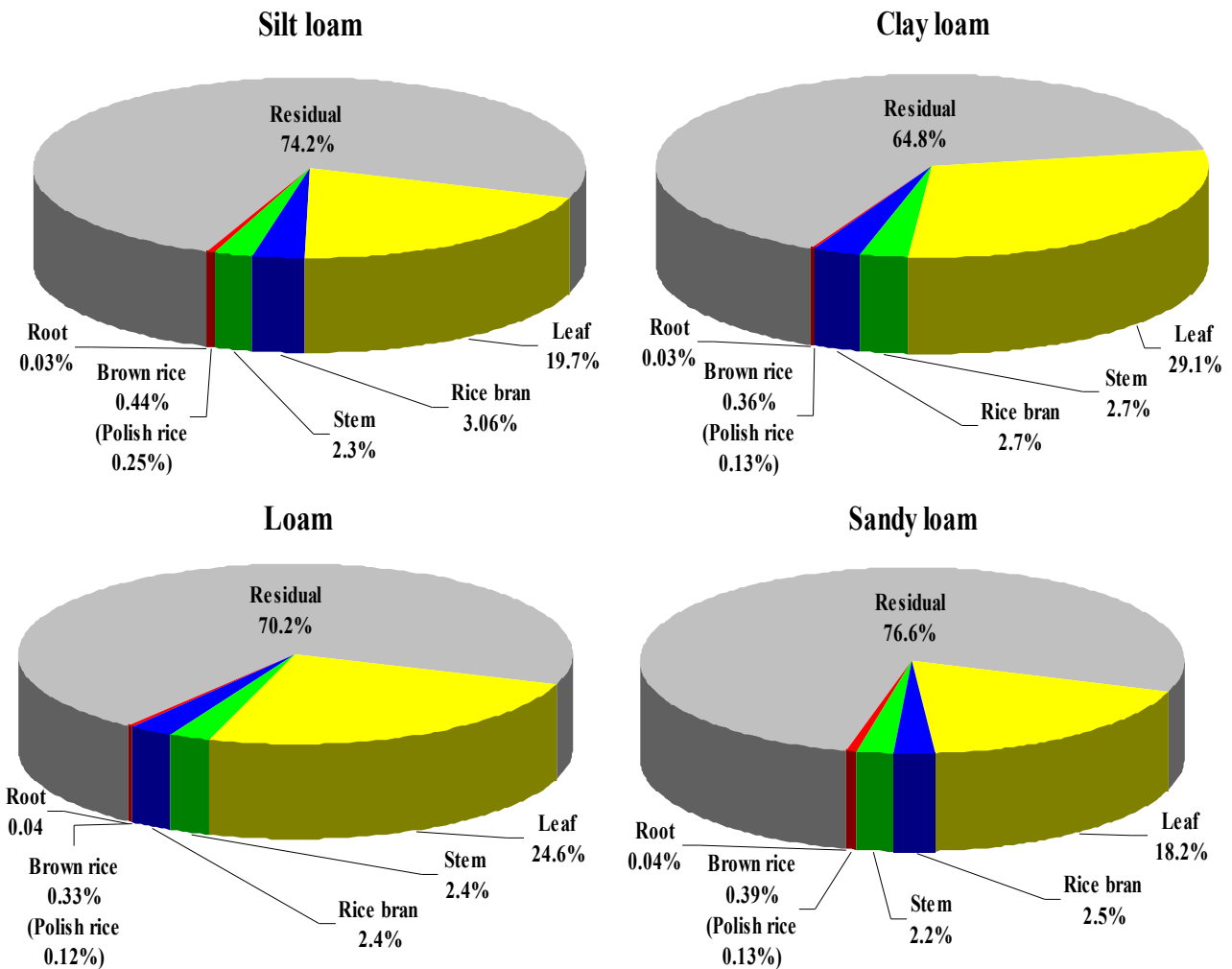


Fig. 2-35. 토성에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율.



(라) 토성에 따른 쌀 미질 특성

토성에 따른 쌀의 미질 특성을 조사한 결과는 Table 2-56에서 보는 바와 같이 단백질 및 Amylose 함량은 모든 토성에서 각각 9.3-10.5 및 20.4-22.8% 정도로 토성에 따라 별 차이 없었다. 또한 알칼리 붕괴도는 양토 ≍ 미사질양토 ≍ 식양토 ≫ 사양토 순이었고, 쌀의 소화율은 전반적으로 토성에 따라 별 차이 없이 낮은 값을 유지하였으며, 벼 토성별 쌀의 심복백은 모든 처리에서 거의 없었다. 쌀 중 질소 함량은 모든 토성에서 1.56-1.77% 정도로 토성에 따라 별 차이 없었고, 쌀 중 인 함량은 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토가 각각 115, 88.0, 66.3 및 101.6 eq로 미사질양토가 다른 토성에 비해 가장 높았으며, 쌀 중 마그네슘 함량도 인 함량과 비슷한 경향으로 미사질양토가 가장 높았다. 따라서 쌀의 미질은 전반적으로 큰 차이는 없었으나, 미사질양토가 다른 토성에 비해 약간 좋은 결과를 보였다.

Table 2-56. 토성에 따른 쌀의 미질 특성

Soil texture	WhiteCore & Velly	Alkiline degree	Gelatinization temperature	Amylose Contents	Protein Contents	N	P	Mg
	(0-9)	(1-7)	Low/High	------(%)-----		--(eq)--		
Silt loam	0/1	5	Low	21.6	9.5	1.59	115.1	71.1
Clay loam	0/1	5	Low	20.4	10.5	1.77	88.0	62.5
Loam	0/1	6	Low	22.8	10.5	1.77	66.3	53.2
Sandy loam	0/1	3	Low	21.2	9.3	1.56	101.6	59.8

(마) 최적 토성 선정

벼 품종에 따른 게르마늄 흡수특성 조사에서 최적조건이었던 호평벼에서 최적 토성을 선정하기 위해 벼의 생육상황, 생산량, 게르마늄 저항성 및 쌀의 미질 등의 일반적인 특성과 게르마늄 흡수 특성을 전체적으로 동시에 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 2-36에서 보는 바와 같다.

최적 품종인 호평벼에서 토성별 벼의 일반적인 특성을 비교한 결과 모든 토성에서 독성, 단백질 및 아밀로스 함량 등은 별 차이 없었으나, 미사질양토의 경우 천립중 및 생산량 등에서 전반적으로 타 토성에 비해 약간 좋았다. 토성별 게르마늄 흡수특성을 비교한 결과 모든 토성에서 잎, 줄기 및 뿌리 중의 게르마늄 함량은 별 차이 없었으나, 미사질양토의 경우 쌀겨, 현미 및 백미 등에서 전반적으로 타 토성에 비해 게르마늄 함량 및 흡수량이 약간 높았다.

이상의 여러 요인을 종합적으로 고려한 결과 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 토성은 미사질양토이었다. 따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀을 효과적으로 생산하기 위해서는 최적 품종인 호평벼를 미사질양토에서 재배해야 할 것으로 판단된다.

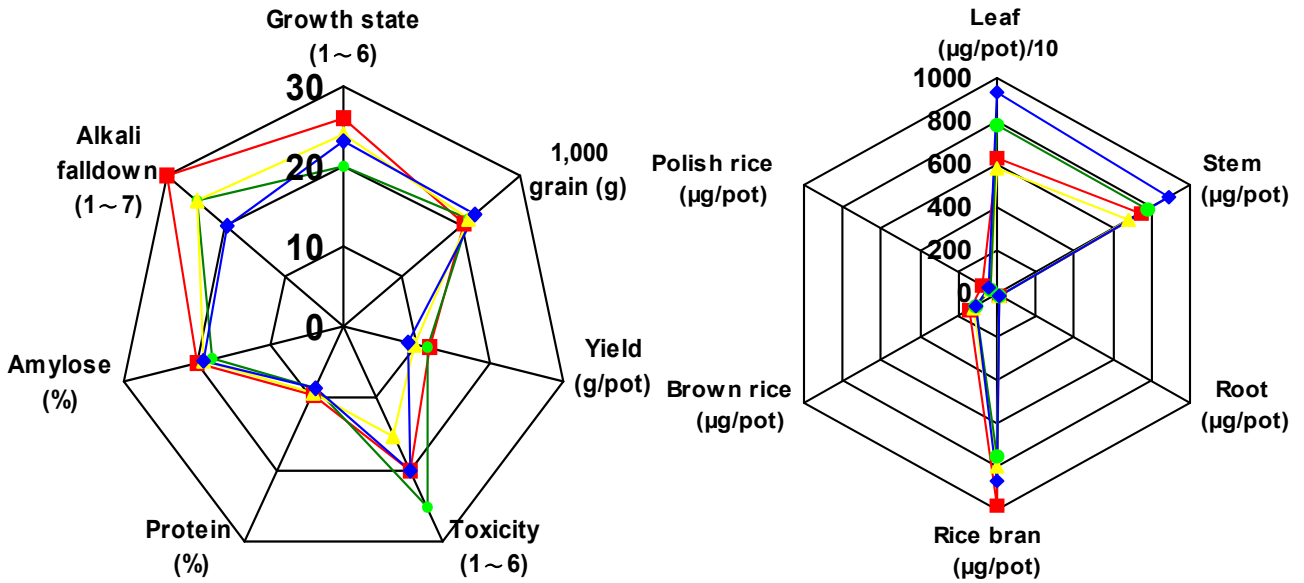


Fig. 2-36. 토성별 벼의 일반적인 특성과 게르마늄 흡수특성.

■ : Silt loam, ▲ : Clay loam,  
● : Loam, ◆ : Sandy loam.

## (2) 게르마늄 처리방법별 벼의 게르마늄 흡수 특성 구명

게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술 개발을 위한 최적 게르마늄 처리방법을 선정하기 위해 상기 1. 항의 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 조사결과 최적 품종인 호평벼와 (2) (가) 항의 토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성 조사결과 최적 토성인 미사질양토 조건 하에서 게르마늄 처리방법을 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리로 구분하여 게르마늄 처리방법별 벼의 생육 특성, 토양 중 무기성분 함량 변화, 게르마늄 처리방법에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성, 게르마늄 처리방법에 따른 쌀 미질 특성을 각각 조사하였고, 이들 결과를 이용하여 최적 게르마늄 처리방법을 선정하였다.

### (가) 게르마늄 처리방법별 벼의 생육특성

게르마늄 처리방법에 따른 벼의 생육특성은 Table 2-57에서 보는 바와 같다. 게르마늄 처리방법에 따른 벼의 초장은 토양처리 및 토양·엽면 동시처리의 경우 비슷한 성장하였으나, 반면에 엽면처리의 경우는 토양처리 및 토양·엽면 동시처리에 비해 약간 적었다. 벼의 초장은 전반적으로 생육시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향으로 특히 최대분얼기 이후에 급격히 증가하였으며, 분얼수와 잎수도 초장과 비슷한 경향이였다.

Table 2-57. 게르마늄 처리방법에 따른 생육시기별 초장, 잎수 및 분얼수 변화

Item	Treatment	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
		----- (ea pot <sup>-1</sup> ) -----			
Plant length	Control	15.4±1.4	38.5±2.0	71.3±1.7	84.0±1.4
	Soil application	15.1±1.9	30.8±3.7	72.5±2.1	78.8±3.9
	Foliar spray	15.7±2.3	35.3±1.8	67.2±2.0	67.2±3.8
	Soil application + Foliar spray	16.0±1.1	30.6±3.3	67.7±1.5	77.7±3.5
No. leaf	Control	19.0±1.3	29.0±4.5	46.3±1.9	56.7±1.4
	Soil application	20.7±1.8	31.7±3.8	48.8±3.6	66.3±3.6
	Foliar spray	19.5±1.9	29.5±1.9	56.0±2.8	53.5±2.0
	Soil application + Foliar spray	16.3±2.7	26.3±3.1	55.2±7.5	58.7±5.6
No. tiller	Control	7.0±0.1	8.0±0.7	10.5±0.9	11.8±2.3
	Soil application	7.0±0.2	8.3±0.8	7.7±0.8	12.5±1.2
	Foliar spray	7.0±0.1	7.8±0.4	8.2±0.8	10.8±2.6
	Soil application + Foliar spray	6.9±0.6	7.4±0.6	9.0±1.1	11.2±1.6

Data represent mean ± SD (n = 6).

게르마늄 처리방법에 따른 벼의 생육시기별 생육상황은 Photo. 2-9에서 보는 바와 같이 토양처리 및 토양·엽면 동시처리의 경우 비슷한 성장을 보였으나, 엽면처리는 다른 조건에 비해 성장이 저조하였다. 엽면살포 및 토양·엽면 동시처리는 게르마늄 독성으로 인해 잎 표면에 갈색 반점이 약간 나타났으나 심하지 않았다. 수확 후 게르마늄 처리방법에 따른 벼의 생육특성은 Table 2-58에서 보는 바와 같이 토양처리가 타 처리방법에 비해 간장, 수장, 수수 및 천립 중 등의 생육특성이 약간 좋았다. 게르마늄 처리방법에 따른 쌀 생산량은 Fig. 2-37에서 보는 바와 같이 토양처리에서 11.8 g pot<sup>-1</sup>로 다른 처리방법에 비해 가장 높은 결과를 보였으며, 전반적으로 토양처리 > 토양·엽면 동시처리 ≒ 엽면처리 순이었다.



이앙직후 (6월21일)



최고분얼기 (7월6일)



수잉기 (8월6일)



출수기 (9월14일)

Photo. 2-9. 게르마늄 처리방법에 따른 벼의 생육시기별 생육상황.

Table 2-58. 게르마늄 처리방법에 따른 벼의 생육특성

Treatment	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	No. panicle per hill	No. grain per panicle	1,000 grain (g)	T/R ratio
Control	57.5±3.5	14.6±1.4	17.2±2.2	39.0± 5.6	23.8±0.1	2.6±0.6
Soil application	49.0±3.1	13.3±2.0	16.0±3.8	36.8± 8.9	20.5±0.8	3.4±1.2
Foliar spray	44.7±3.0	11.4±1.6	6.8±1.9	37.0±15.8	19.7±0.2	2.5±0.6
Soil application + Foliar spray	43.3±2.8	12.8±1.5	14.3±5.0	28.3± 4.9	20.7±0.7	3.0±0.8

Data represent mean ± SD (n = 6).

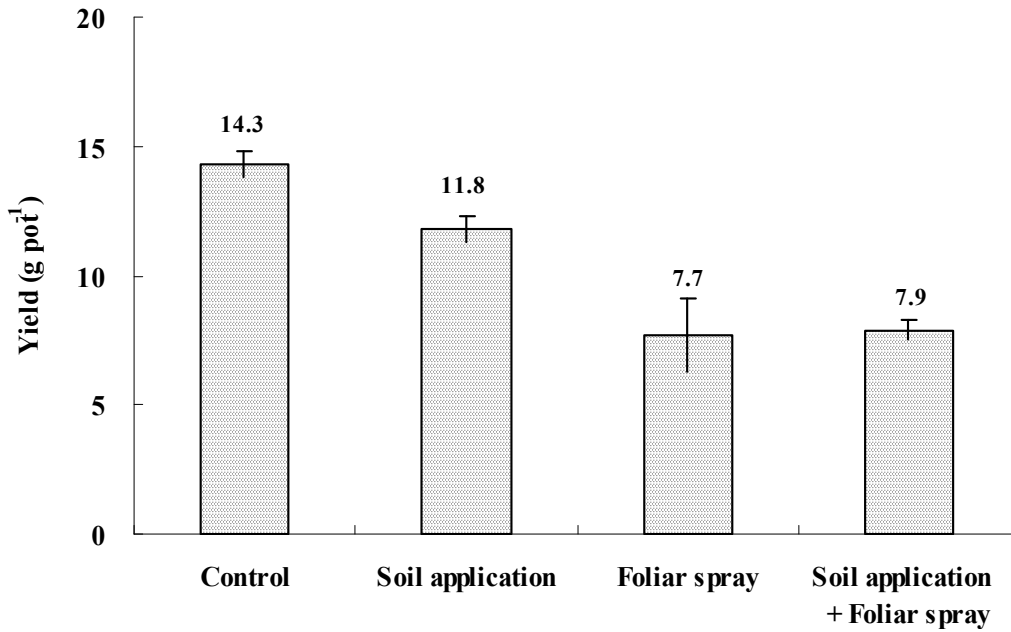


Fig. 2-37. 게르마늄 처리방법에 따른 벼의 생산량. Error bars represent SD (n = 6).

(나) 게르마늄 처리방법별 토양 중 무기성분 함량 변화

벼 수확 후 게르마늄 처리방법별 토양 중 무기성분 함량은 Table 2-59에서 보는 바와 같이 토양처리 및 토양·엽면 동시처리의 경우 비슷한 경향을 보인 반면에 엽면처리는 다른 처리에 비해 약간 낮았다. 이는 엽면처리의 경우 벼의 생육이 게르마늄 독성으로 인해 전반적으로 좋지 않아 재배시기 동안 이들 독성을 완화하기 위해 타 처리에 비해 많은 무기성분을 흡수한 것으로 판단된다.

토양 중 T-N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 및 SiO<sub>2</sub> 함량은 토양처리가 다른 처리방법에 비해 미미하게 높았다. 게르마늄 처리방법별 토양 중 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 게르마늄 처리방법에 따라 별 차이 없었다.

Table 2-59. 게르마늄 처리방법에 따른 토양 중 무기성분 함량

Treatment	T-N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Ex.Cat (cmol+ kg <sup>-1</sup> )			
	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----			K	Ca	Mg	Na
Control	409± 15	515± 15	164± 7	0.15±0.01	6.32±0.6	0.26±0.03	0.13±0.11
Soil application	402± 28	510± 51	157± 2	0.14±0.02	6.20±0.7	0.31±0.05	0.14±0.02
Foliar spray	299±127	570±132	152± 7	0.17±0.05	6.34±0.2	0.34±0.04	0.13±0.03
Soil application + Foliar spray	387± 32	527± 32	144±11	0.14±0.01	6.67±0.5	0.34±0.03	0.32±0.02

Data represent mean ± SD (n = 6).

(다) 게르마늄 처리방법에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성

① 벼 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

게르마늄 처리방법에 따른 벼 부위별 건물중량 및 게르마늄 함량은 Table 2-60에서 보는 바와 같다. 게르마늄 처리방법에 따른 벼 부위별 건물중량은 전반적으로 잎 > 줄기 > 뿌리 순으로 높았다. 게르마늄 처리방법에 따른 벼 부위별 게르마늄 함량은 잎의 경우 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리가 각각 842, 1343 및 1024 mg kg<sup>-1</sup>로 엽면처리 > 토양·엽면 동시처리 > 토양처리 순이었으며, 줄기의 경우 잎과 비슷한 경향으로 엽면처리 > 토양·엽면 동시처리 > 토양처리 순이었고, 뿌리의 경우 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리가 각각 2.3, 3.6 및 4.1 mg kg<sup>-1</sup>로 토양·엽면 동시처리 > 엽면처리 > 토양처리 순이었다.

Table 2-60. 게르마늄 처리방법에 따른 벼의 건물중량과 게르마늄 함량

Treatment	Dry weight (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
Control	9.1±1.7	6.7±0.8	6.04±2.2	1.7± 0.6	0.9± 0.3	0.3±0.2
Soil application	7.5±1.2	5.4±0.4	3.84±0.7	841.6±237.0	137.4±38.5	2.3±0.8
Foliar spray	6.0±1.8	2.4±1.0	3.29±2.4	1343.2±227.6	159.1±70.8	3.6±0.8
Soil application + Foliar spray	7.7±1.2	4.6±0.8	4.14±1.2	1023.5±183.3	144.4±54.6	4.1±1.3

Data represent mean ± SD (n = 6).

게르마늄 처리방법에 따른 게르마늄 흡수량은 Fig. 2-38에서 보는 바와 같이 잎의 경우 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리가 각각 6295, 8086 및 7891 µg pot<sup>-1</sup>로 엽면처리와 토양처리가 토양·엽면 동시처리에 비해 약간 높은 경향이었으며, 줄기의 경우 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리가 각각 724, 374 및 674 µg pot<sup>-1</sup>로 토양처리가 가장 높았으며, 뿌리의 경우 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리가 각각 8.9, 12.1 및 17.1 µg pot<sup>-1</sup>로 토양·엽면 동시처리 > 엽면처리 > 토양처리 순이었다.

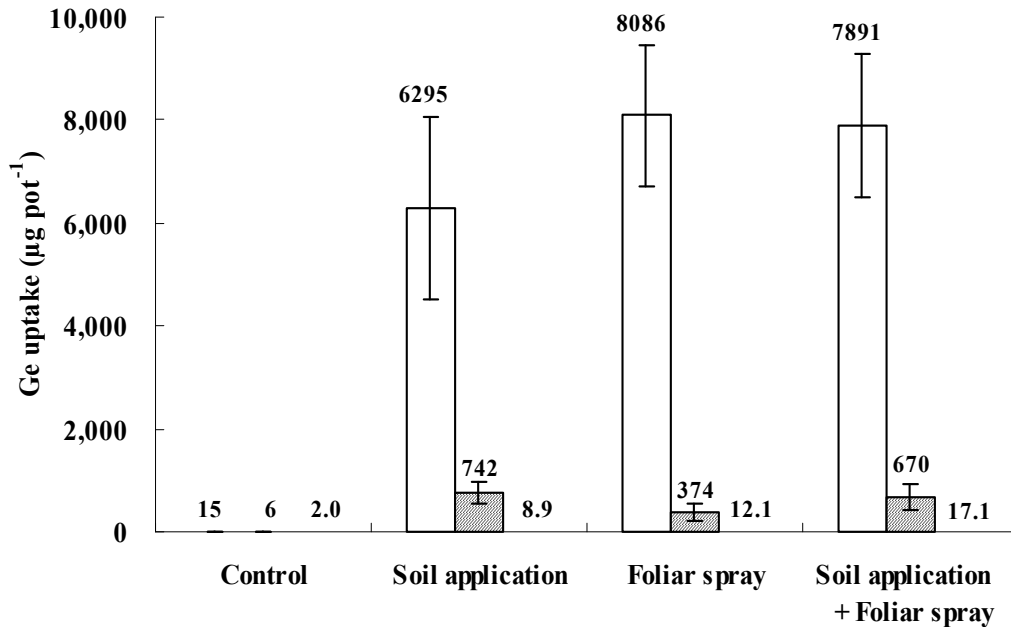


Fig. 2-38. 게르마늄 처리방법에 따른 벼의 흡수량. Error bars represent SD (n = 6).

□ : Leaf,    ▨ : Stem,    ▩ : Root.

② 쌀 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

게르마늄 처리방법에 따른 쌀의 생산량은 Table 2-61에서 보는 바와 같이 전반적으로 현미 > 백미 > 쌀겨 순으로 높았다. 게르마늄 처리방법에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량은 쌀겨의 경우 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리가 각각 457, 548 및 351 mg kg<sup>-1</sup>로 엽면처리 > 토양처리 > 토양·엽면 동시처리 순이었으며, 현미의 경우 토양·엽면 동시처리 > 엽면처리 ≒ 토양처리 순이었으며, 백미의 경우 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리가 각각 8.3, 11.6 및 9.8 mg kg<sup>-1</sup>로 게르마늄 처리방법에 따라 별 차이 없었다 (Table 2-61).

Table 2-61. 게르마늄 처리방법에 따른 쌀의 생산량과 게르마늄 함량

Treatment	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
Control	2.6±0.1	11.7±0.4	11.5±0.4	3.2± 2.0	0.8±0.2	0.5±0.3
Soil application	2.1±0.1	9.7±0.4	9.5±0.4	457.2±29.8	14.5±1.4	8.3±1.2
Foliar spray	1.4±0.2	6.3±1.1	6.2±1.1	548.2±28.1	14.5±1.2	11.6±2.1
Soil application + Foliar spray	1.4±0.1	6.5±0.3	6.4±0.3	351.1±11.6	22.6±2.2	9.8±0.6

Data represent mean ± SD (n = 6).

게르마늄 처리방법에 따른 쌀의 게르마늄 흡수량은 Fig. 2-39에서 보는 바와 같이 쌀겨의 경우 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리가 각각 980, 767 및 504  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 토양처리가 타 처리에 비해 가장 높은 결과를 보였으며, 현미의 경우 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리가 각각 140, 91 및 146  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 토양처리와 토양·엽면 동시처리가 엽면처리에 비해 높은 결과를 보였고, 백미의 경우 모든 처리에서 62-79  $\mu\text{g pot}^{-1}$  정도로 게르마늄 처리방법에 따라 별 차이 없었다.

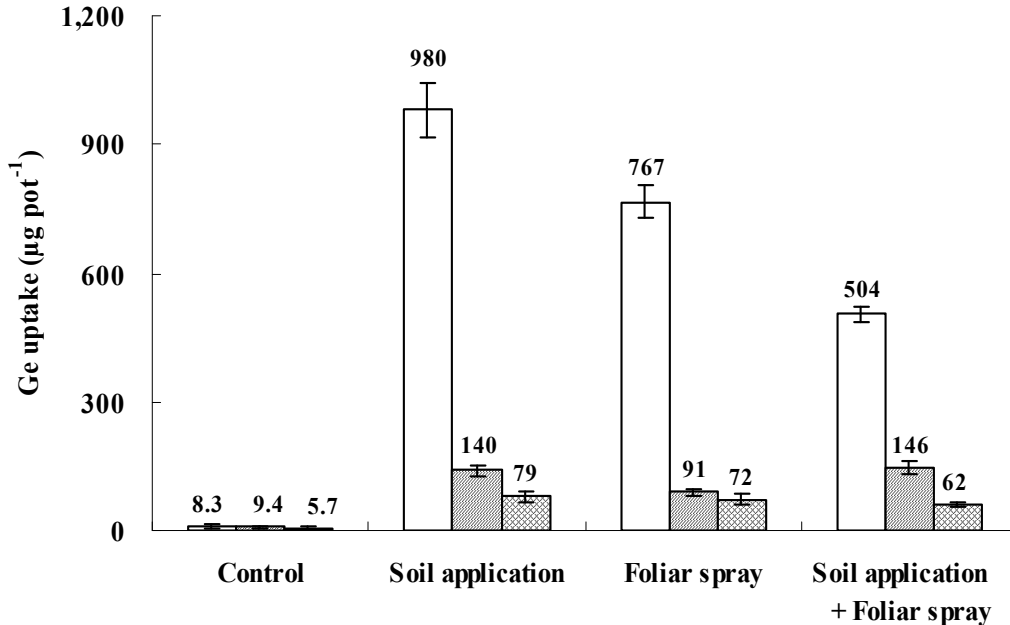


Fig. 2-39. 게르마늄 처리방법별 쌀의 게르마늄 흡수량. Error bars represent SD (n = 6).

□ : Rice bran,    ▨ : Brown rice,    ▩ : Polished rice.

### ③ 게르마늄 처리방법에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율 비교

게르마늄 처리방법에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 Fig. 2-40에서 보는 바와 같다. 게르마늄 무처리의 벼 부위별 게르마늄은 모든 부위에서 거의 흡수되지 않았다. 토양처리에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 잎이 19.7%, 줄기가 2.3%, 뿌리가 0.003%, 쌀겨가 3.1% 현미가 0.43% (백미 0.25%)로서 총 게르마늄의 25.8%가 흡수되고 토양 내에 74.3%의 게르마늄이 잔류하였으며, 엽면처리의 게르마늄 흡수율은 잎이 25.3%, 줄기가 1.2%, 뿌리가 0.004%, 쌀겨가 2.4% 현미가 0.29% (백미 0.23%)로서 총 게르마늄의 29.4%가 흡수하고 토양 내에 70.6%의 게르마늄이 잔류하였고, 토양·엽면 동시처리에서 게르마늄 흡수율은 잎이 24.7%, 줄기가 2.1%, 뿌리가 0.005%, 쌀겨가 1.6% 현미가 0.46% (백미 0.20%)로서 총 게르마늄의 29%가 흡수되고 토양내에 71.0%의 게르마늄이 잔류하였다.



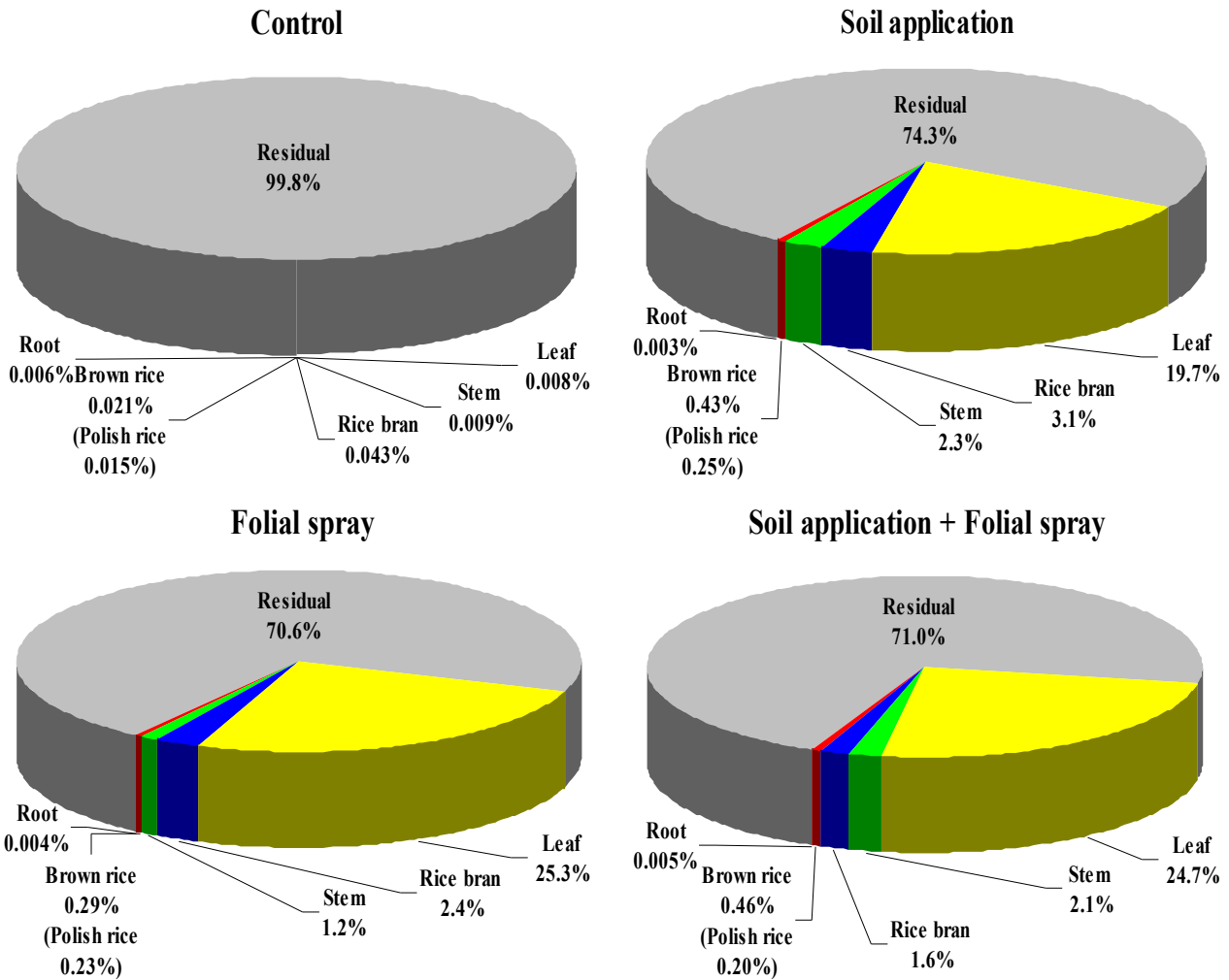


Fig. 2-40. 게르마늄 처리방법에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율.

(라) 게르마늄 처리방법에 따른 쌀 미질 특성

게르마늄 처리방법에 따른 쌀 미질 특성을 조사한 결과 Table 2-62에서 보는 바와 같다. 단백질 함량은 모든 처리에서 별 차이 없이 9.3-9.7% 정도 이었고, Amylose 함량은 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리가 각각 21.7, 22.7 및 20.5%로 게르마늄 처리방법에 따라 별 차이 없었다. 또한 알칼리붕괴도는 토양처리 > 엽면처리 > 토양·엽면 동시처리 순으로 토양처리가 가장 좋았고, 쌀의 소화온도는 전반적으로 모든 처리에서 별 차이 없이 낮았으며, 게르마늄 처리방법에 따른 쌀의 심복백은 모든 조건에서 별 차이 없이 거의 없었다. 쌀 중 질소 및 인 함량은 게르마늄 처리방법에 따라 별 차이 없이 비슷한 경향이였다. 쌀 중 마그네슘 함량은 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리가 각각 71.1, 66.0 및 68.6 eq로 토양처리가 다른 처리에 비해 가장 높았다.

따라서 쌀의 미질은 게르마늄 처리방법에 따라 전반적으로 별 차이 없었으나, 토양처리가 다른 처리에 비해 미미하게 좋은 경향이였다.

Table 2-62. 게르마늄 처리방법에 따른 쌀 미질 특성

Treatment	WhiteCore & Velly (0-9)	Alkiline degree (1-7)	Gelatinization temperature Low/High	Amylose Contents	Protein Contents (%)	N	P	Mg
Control	0/1	4	Low	21.6	9.3	1.56	101.6	57.1
Soil application	0/1	5	Low	21.7	9.5	1.59	115.1	71.1
Foliar spray	0/1	4	Low	22.7	9.7	1.63	112.4	66.0
Soil application + Foliar spray	0/1	3	Low	20.5	9.3	1.56	112.4	68.6

Data represent mean  $\pm$  SD (n = 6).

(마) 최적 게르마늄 처리방법 선정

미사질양토에 호평벼를 이양한 최적 조건 하에서 최적 게르마늄 처리방법을 선정하기 위해 벼의 생육상황, 생산량, 게르마늄 저항성 및 쌀의 미질 등의 일반적인 특성과 게르마늄 흡수 특성을 전체적으로 동시에 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 2-41에서 보는 바와 같다.

게르마늄 처리방법별 벼의 일반적인 특성을 비교한 결과 모든 처리에서 알카리붕괴도, 단백질 및 아밀로스 함량 등은 별 차이 없었으나, 게르마늄 토양처리의 경우 천립중 및 생산량 등에서 전반적으로 타 처리에 비해 약간 좋았다. 게르마늄 처리방법별 게르마늄 흡수특성을 비교한 결과 모든 처리에서 잎, 줄기 및 뿌리 중의 게르마늄 함량은 별 차이 없었으나, 게르마늄 토양처리의 경우 쌀겨, 현미 및 백미 등에서 전반적으로 타 처리방법에 비해 게르마늄 함량 및 흡수량이 약간 높았다.

이상의 여러 요인을 종합적으로 고려한 결과 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 게르마늄 처리방법은 토양처리이었다. 따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀을 효과적으로 생산하기 위해서는 미사질양토에 게르마늄을 주입한 후 최적 품종인 호평벼를 재배해야 할 것으로 판단 된다.

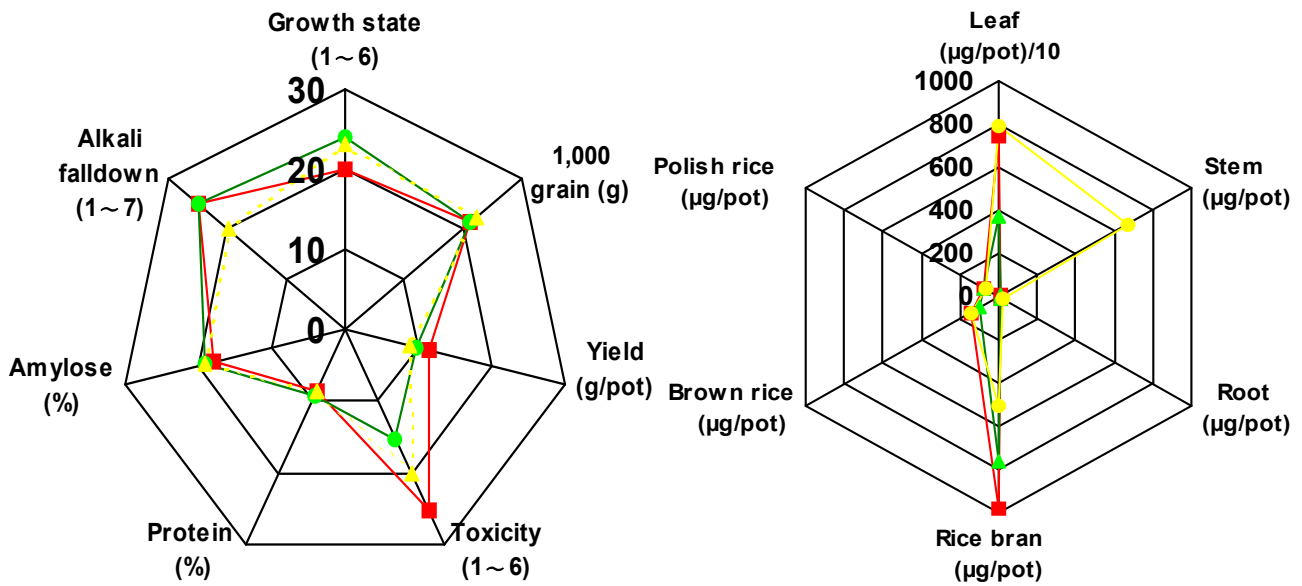


Fig. 2-41. 게르마늄 처리방법에 따른 벼의 일반적인 특성과 게르마늄 흡수특성.

■ : Soil application, ▲ : Foliar spray,  
● : Soil application + Foliar spray.

### (3) 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 게르마늄 흡수 특성 구명

게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술 개발을 위한 최적 게르마늄과 최적 게르마늄 토양처리 횟수를 선정하기 위해 상기 (1) 항의 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 조사결과 최적 품종인 호평벼와 (2) (가) 항의 토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성 조사결과 최적 토성인 미사질양토, 그리고 II. 2. 항의 게르마늄 처리방법별 벼의 게르마늄 흡수 특성 조사결과 최적 게르마늄 처리방법인 토양처리 조건 하에서 게르마늄을 무기게르마늄 ( $\text{GeO}_2$ )과 유기게르마늄 (Ge-132)으로 구분하여 최적 품종인 호평벼를 미사질양토에 이양 후 게르마늄 토양처리 횟수를 각각 1회 (최고분얼기), 2회 (최고분얼기 및 수잉기) 및 3회 (최고분얼기, 수잉기 및 출수기)로 나누어 게르마늄 종류에 따른 처리횟수별 벼의 생육특성, 게르마늄 종류에 따른 처리횟수별 토양 중 무기성분 함량 변화, 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성, 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수에 따른 쌀 미질 특성을 각각 조사하였고, 이들 결과를 이용하여 최적 게르마늄과 토양처리 횟수를 선정하였다.

#### (가) 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 생육특성

게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 생육특성은 Fig. 2-42, Table 2-63 및 3-64에서 보는 바와 같이 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 초장은 대조구와 Ge-132 처리구가  $\text{GeO}_2$  처리구에 비해 초장이 약간 길었으며, 게르마늄 토양처리 횟수별 초장은 게르마늄 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없이 비슷하였다. 또한 모든 조건에서 벼의 초장은 전반적으로 생육시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향으로 특히 최대분얼기 이후에 급격히 증가하는 경향이였다. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수별 벼의 잎수 및 분얼수는 게르마늄 종류 및 토양

처리 횟수에 따라 별 차이 없이 비슷한 경향이였다.

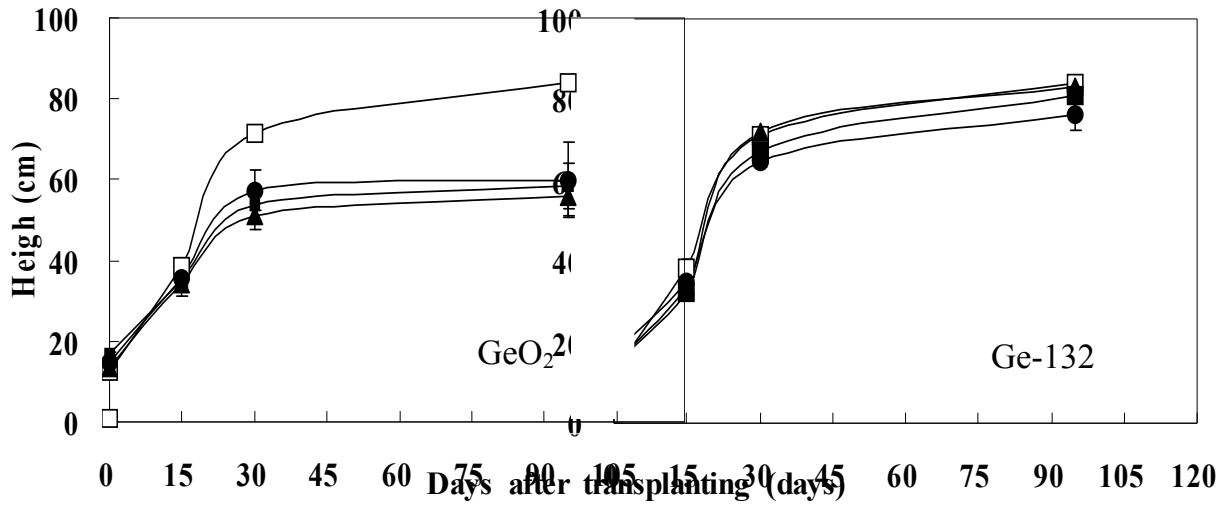


Fig. 2-42. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수별 초장변화. Error bars represent SD (n = 6).

□ : Control,    ▲ : 1 time,    ■ : 2 times,    ● : 3 times.

Table 2-63. 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 잎수 변화

Treatment	Time	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
		(ea pot <sup>-1</sup> )			
Control		19.0±1.3	29.0±4.5	46.3±1.9	56.7±1.4
GeO <sub>2</sub>	1	20.1±1.6	32.6±3.2	42.6±2.9	49.1±1.9
	2	19.0±2.4	33.0±4.4	45.2±1.4	50.8±1.2
	3	20.5±1.3	33.5±2.9	46.7±2.3	50.5±1.9
Ge-132	1	20.3±2.2	36.3±6.0	46.8±4.3	55.3±6.3
	2	20.3±1.6	36.3±3.6	62.2±3.2	55.3±4.9
	3	21.1±2.1	36.3±5.4	52.0±4.1	43.3±1.6

Data represent mean ± SD (n = 6).

Table 2-64. 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 분얼수 변화

Treatment	Time	Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
		----- (ea pot <sup>-1</sup> ) -----			
Control		7.0±0.1	8.0±0.7	10.5±0.9	11.8±2.3
GeO <sub>2</sub>	1	7.0±0.3	7.5±1.3	9.6±1.0	9.8±1.9
	2	7.0±0.2	8.5±1.0	10.2±1.6	11.3±0.9
	3	7.0±0.3	8.0±0.6	8.5±0.8	10.5±1.4
Ge-132	1	7.0±0.3	8.8±1.3	10.5±1.6	15.2±1.8
	2	7.0±0.4	9.8±0.8	10.3±1.9	14.2±1.3
	3	7.0±0.2	9.2±1.2	11.2±1.6	15.3±3.8

Data represent mean ± SD (n = 6).

게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 생육상황은 Photo. 2-10에서 보는 바와 같이 GeO<sub>2</sub> 처리구가 Ge-132 처리구에 비해 전반적으로 생육이 저조하였으며, GeO<sub>2</sub> 처리구 모두에서 게르마늄 독성으로 인해 잎 표면에 갈색 반점이 나타났다. 수확 후 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 벼의 생육특성은 Table 2-65에서 보는 바와 같이 Ge-132 처리구가 GeO<sub>2</sub> 처리구에 비해 간장, 수장, 수수 및 천립중 등의 생육특성이 약간 좋았으며, 게르마늄 토양처리 횟수별 생육특성은 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 간장, 수장, 수수 및 천립중 등의 생육상태가 점점 좋아지는 경향이였다. 이와 같이 주입된 게르마늄 총 함량은 횟수별로 동일함에도 불구하고 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 벼 생육이 점점 좋아지는 것은 주입된 게르마늄을 여러 횟수로 나누어 처리함으로서 게르마늄 독성이 상대적으로 줄어들었기 때문으로 사료된다.

게르마늄 종류별 쌀 생산량은 Fig. 2-43에서 보는 바와 같이 Ge-132 처리구가 GeO<sub>2</sub> 처리구에 비해 많았으며, 토양처리 횟수별 쌀 생산량은 전반적으로 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 3회 > 2회 > 1회 순이었으며, Ge-132 처리구의 경우 토양처리 횟수별로 별 차이 없었다.



이양직후 (6월21일)



최고분얼기 (7월6일)



수잉기 (8월6일)



출수기 (9월14일)

Photo. 2-10. 게르마늄 종류별 토양처리 횟수에 따른 벼의 생육상황.

게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 생육특성은 Table 2-65에서 보는 바와 같이  $\text{GeO}_2$  처리구의 경우 토양처리 횟수가 증가 할수록 전반적으로 양호해졌으며, 모든 처리구에서 독성이 발현되어 간장, 수장, 수수 및 천립중이 떨어져 수량이 감소되었다. Ge-132 처리구의 생육특성은 무처리구와 비슷한 경향으로 게르마늄의 독성이 거의 나타나지 않았다. 게르마늄 종류별 및 횟수별 쌀 생산량은 Fig. 2-46에서 보는 바와 같이  $\text{GeO}_2$  처리구의 경우 3회 > 2회 > 1회 순으로 증가하였고, Ge-132 처리구의 경우 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없었다. 전반적으로  $\text{GeO}_2$  처리구가 Ge-132 처리구에 비해 생육상태 및 쌀 생산량이 약간 저조하였다.

Table 2-65. 게르마늄 토양처리 횟수별 벼의 생육특성

Treatment	Time	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	No. panicle per hill	No. grain per panicle	1,000 grain (g)	T/R ratio
Control		57.5±3.5	14.6±1.4	17.2±2.2	39.0± 5.6	23.8±0.1	2.6±0.6
GeO <sub>2</sub>	1	36.0±6.6	11.5±1.7	6.3±2.7	28.6±17.2	18.6±0.2	3.5±1.0
	2	38.6±2.1	12.9±0.7	8.3±1.2	31.6± 3.6	17.5±0.1	3.3±1.2
	3	41.2±1.9	13.8±0.4	8.7±1.8	35.1± 4.8	17.1±0.3	3.2±1.0
Ge-132	1	60.4±3.3	15.4±1.7	17.0±4.0	41.7± 6.9	23.1±0.7	3.0±1.9
	2	59.2±1.8	15.4±1.4	14.3±3.1	50.3±10.1	23.9±1.2	2.5±0.6
	3	51.7±3.8	14.6±1.3	14.7±2.2	44.4± 5.0	20.0±0.9	2.0±0.7

Data represent mean ± SD (n = 6).

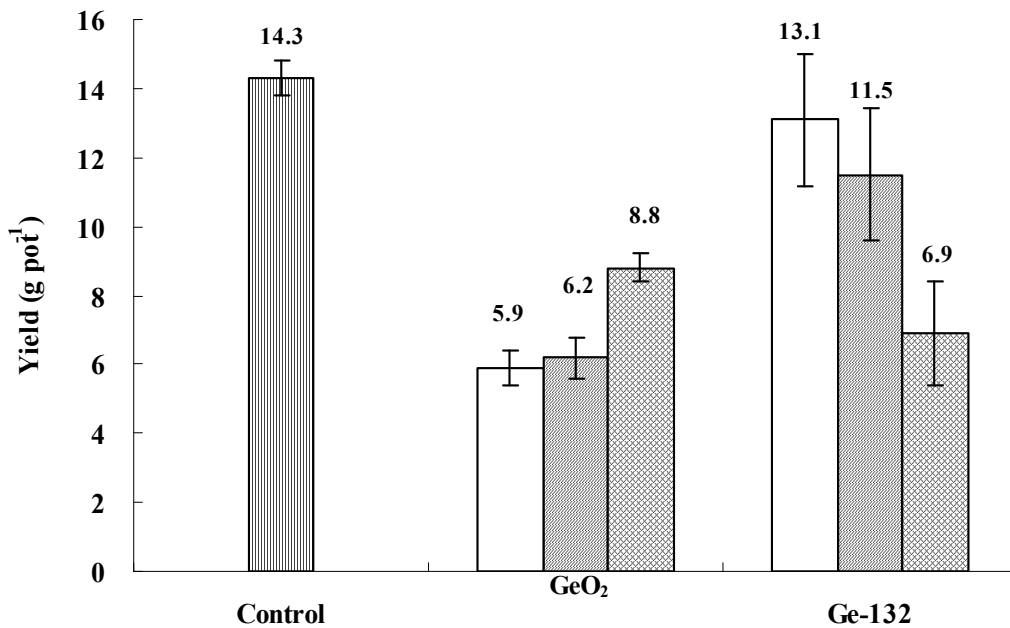


Fig. 2-43. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수별 쌀 생산량. Error bars represent SD (n = 6).

▨ : Control, □ : 1 time, ▩ : 2 times, ▪ : 3 times.

(나) 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 토양 중 무기성분 함량 변화

벼 수확 후 토양 중 무기성분 함량은 Table 2-66에서 보는 바와 같다. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 토양 중 T-N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 및 SiO<sub>2</sub> 함량은 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 전반적으로 3회 > 2회 > 1회 순으로 높았고, Ge-132 처리구의 경우 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없었다. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 토양 중 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 전반적으로 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없었다.

Table 2-66. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수별 토양 중 무기성분 함량

Treatment	Time	T-N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Ex.Cat (cmol+ kg <sup>-1</sup> )			
		(mg kg <sup>-1</sup> )			K	Ca	Mg	Na
Control		409±15	515±15	164± 7	0.15±0.01	6.32±0.6	0.26±0.03	0.13±0.11
GeO <sub>2</sub>	1	336±56	523±36	160± 6	0.15±0.02	6.74±0.3	0.29±0.02	0.55±0.09
	2	344±53	520±24	168±11	0.16±0.02	6.40±0.3	0.28±0.02	0.42±0.13
	3	389±47	460±53	181± 6	0.14±0.02	5.79±0.5	0.27±0.04	0.30±0.01
Ge-132	1	408±15	458±61	137± 5	0.11±0.01	5.09±0.4	0.22±0.03	0.25±0.10
	2	354±52	493±74	135± 7	0.13±0.02	5.72±0.5	0.30±0.03	0.23±0.10
	3	343±97	458±24	129± 7	0.10±0.02	5.46±0.6	0.25±0.03	0.11±0.01

Data represent mean ± SD (n = 6).

(다) 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성

① 벼 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 벼의 건물중량 및 게르마늄 함량은 Table 2-67에서 보는 바와 같다. 게르마늄 토양처리 횟수별 벼의 건물중량은 처리횟수에 따라 다소 차이는 있으나 전반적으로 잎 > 줄기 > 뿌리 순이었다.

게르마늄 토양처리 횟수에 따른 잎의 게르마늄 함량은 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 1회, 2회 및 3회가 각각 1481, 1681 및 2223 mg kg<sup>-1</sup>로 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 증가하는 경향이었고, Ge-132 처리구의 경우 모든 횟수에서 102-163 mg kg<sup>-1</sup>로 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없었다. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 줄기의 게르마늄 함량은 GeO<sub>2</sub> 및 Ge-132 처리구의 경우 모든 토양처리 횟수에서 각각 196-255 및 37-43 mg kg<sup>-1</sup>로 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없었다. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 뿌리의 게르마늄 함량은 GeO<sub>2</sub> 및 Ge-132 처리구의 경우 모든 토양처리 횟수에서 각각 5.2-6.1 및 1.4-1.6 mg kg<sup>-1</sup>로 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없었다.



Table 2-67. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 벼의 건물중량과 게르마늄 함량

Treatment	Time	Dry weight (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
		Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
Control		9.1±1.7	6.7±0.8	6.0±2.2	1.7±0.6	0.9±0.3	0.3±0.2
GeO <sub>2</sub>	1	4.1±0.9	1.3±1.2	1.2±1.0	1481±264	196±110	5.2±1.7
	2	4.2±0.6	1.7±0.3	1.9±0.4	1681±164	210± 41	5.7±1.1
	3	5.3±1.7	1.4±0.9	1.9±1.3	2223±662	255±117	6.1±1.2
Ge-132	1	9.7±0.9	9.5±2.0	6.5±0.8	125± 11	43± 8	1.6±1.1
	2	9.4±1.1	7.6±1.0	6.7±1.9	102± 17	37± 9	1.4±0.6
	3	10.9±1.3	6.9±1.7	8.8±2.2	163± 99	39± 11	1.4±0.5

Data represent mean ± SD (n = 6).

게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 Fig. 2-44에서 보는 바와 같다. 게르마늄 토양처리 횟수에 따른 잎의 게르마늄 흡수량은 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 토양처리 횟수 1회, 2회 및 3회가 각각 6016, 6830 및 11782 µg pot<sup>-1</sup>로 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 증가하는 경향이었고, Ge-132 처리구의 경우 모든 처리가 큰 차이는 없었으나 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 미미하게 감소되는 경향이였다.

게르마늄 토양처리 횟수에 따른 줄기의 게르마늄 흡수량은 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 1회, 2회 및 3회가 각각 161, 352 및 356 µg pot<sup>-1</sup>로 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 점점 증가하는 경향이었고, Ge-132 처리구의 경우 잎과 비슷한 경향으로 모든 처리가 큰 차이는 없었으나 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 미미하게 감소되는 경향이였다.

게르마늄 토양처리 횟수에 따른 뿌리의 게르마늄 흡수량은 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 0.6~1.1 µg pot<sup>-1</sup>정도로 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없었고, Ge-132 처리구의 경우도 비슷한 경향이였다.

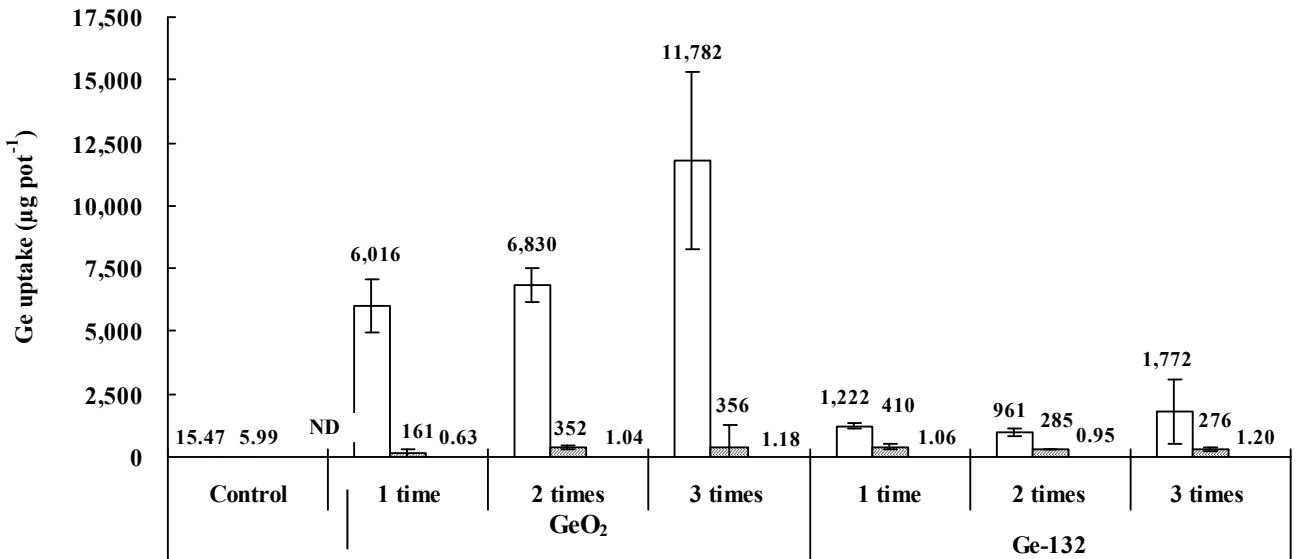


Fig. 2-44. 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 게르마늄 흡수량. Error bars represent SD (n = 6).

□ : Leaf,    ▨ : Stem,    ▩ : Root.

### ② 쌀 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 쌀 생산량은 Table 2-68에서 보는 바와 같이 토양처리 횟수에 따라 다소 차이는 있으나 전반적으로 현미 > 백미 > 쌀겨 순이었다. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량은 Table 2-67에서 보는 바와 같다. 게르마늄 토양처리 횟수에 따른 쌀겨 중 게르마늄 함량은  $\text{GeO}_2$  처리구의 경우 1회, 2회 및 3회가 각각 567, 576 및 687  $\text{mg kg}^{-1}$ 로 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 증가하는 경향이었고,  $\text{Ge-132}$  처리구의 경우 1회, 2회 및 3회가 각각 119, 106 및 89  $\text{mg kg}^{-1}$ 로 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 감소하는 경향이였다.

게르마늄 토양처리 횟수에 따른 현미 중 게르마늄 함량은  $\text{GeO}_2$  처리구의 경우 1회, 2회 및 3회가 각각 36, 48 및 59  $\text{mg kg}^{-1}$ 로 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 점점 증가하는 경향이었고,  $\text{Ge-132}$  처리구의 경우 모든 처리가 4.5-5.6  $\text{mg kg}^{-1}$ 로 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없었다.

게르마늄 토양처리 횟수에 따른 백미 중 게르마늄 함량은  $\text{GeO}_2$  처리구의 경우 전반적으로 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없었고,  $\text{Ge-132}$  처리구의 경우도 비슷하였다. 또한 현미 중의 게르마늄 함량이 전반적으로 백미보다 높은 경향이였다.

Table 2-68. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수별 쌀의 생산량과 게르마늄 함량

Treatment	Time	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
		Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
Control		2.6±0.1	11.7±0.4	11.5±0.4	3.2± 2.0	0.8± 0.2	0.5± 0.3
GeO <sub>2</sub>	1	0.5±0.1	2.1±0.5	2.0±0.5	567.3±26.1	36.2± 9.6	17.9± 7.3
	2	0.3±0.1	1.2±0.5	1.1±0.5	576.9±11.4	48.4±12.4	13.0±10.0
	3	0.9±0.1	4.2±0.4	4.1±0.3	687.0±60.3	59.3±18.2	16.0±12.1
Ge-132	1	1.4±0.4	6.5±1.6	6.4±1.6	119.6± 4.6	5.6± 0.2	2.4± 0.2
	2	0.8±0.9	3.6±4.1	3.6±4.0	106.6± 5.2	5.4± 0.3	2.7± 0.2
	3	0.7±0.3	3.0±1.2	3.0±1.2	89.5± 2.0	4.5± 0.8	2.2± 1.2

Data represent mean ± SD (n = 6).

게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 Fig. 2-45에서 보는 바와 같다. 게르마늄 토양처리 횟수에 따른 쌀겨의 게르마늄 흡수량은 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 1회, 2회 및 3회가 각각 526, 650 및 1098 µg pot<sup>-1</sup>로 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 점점 증가하는 경향이었고, Ge-132 처리구의 경우 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없었다.

게르마늄 토양처리 횟수에 따른 현미의 게르마늄 흡수량은 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 쌀겨와 비슷한 경향으로 1회, 2회 및 3회가 각각 151, 245 및 425 µg pot<sup>-1</sup>로 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 점점 증가하는 경향이었고, Ge-132 처리구의 경우 GeO<sub>2</sub> 처리구에 비해 흡수량이 매우 적었으며, 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 점점 감소하는 경향이였다.

게르마늄 토양처리 횟수에 따른 백미의 게르마늄 흡수량은 전반적으로 현미와 비슷한 경향이였으나, 백미의 게르마늄의 흡수량은 현미에 비해 적었다.

이상의 결과에서 쌀에 게르마늄을 효과적으로 흡수시키기 위한 최적 게르마늄은 GeO<sub>2</sub> 처리구이었고, 최적 게르마늄 토양처리 횟수는 3회이었다. 하지만 게르마늄의 토양처리 횟수별 쌀의 게르마늄 함량은 벼 이앙 전 토양에 게르마늄 동량을 사전 처리한 상기 (나) ② 항의 게르마늄 처리방법별 게르마늄 흡수특성 조사 결과에 비해 약간 높았으나, 쌀 생산량은 오히려 급격히 감소하였다.

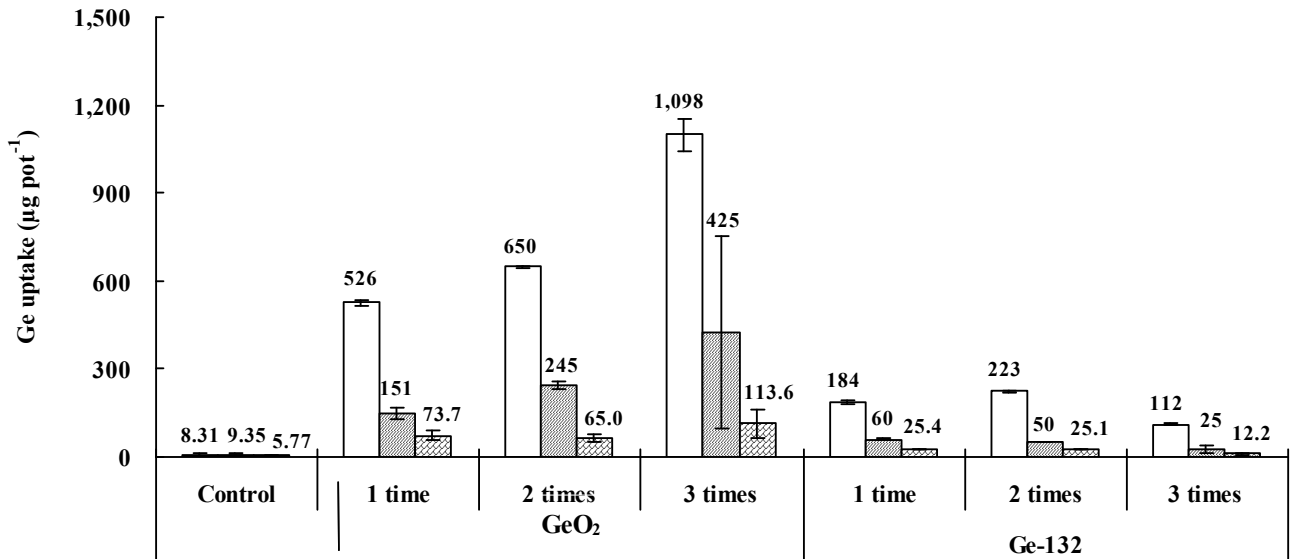


Fig. 2-45. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수별 쌀의 흡수량. Error bars represent SD (n = 6).  
□ : Rice bran,    ▨ : Brown rice,    ▩ : Polished rice.

③ 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율 비교

게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 Fig. 2-46에서 보는 바와 같이 전반적으로 잎 > 쌀겨 > 현미(백미) > 줄기 > 뿌리 순으로 잎에서 가장 높았다.

GeO<sub>2</sub> 처리구에서 게르마늄 토양처리 횟수에 따른 게르마늄 흡수율은 1회 처리의 경우 잎이 18.8%, 줄기가 0.8%, 뿌리가 0.002%, 쌀겨가 1.6% 및 현미가 0.47% (백미 0.23%)로서 총 게르마늄의 21.7%가 흡수되고 토양 내에 78.3%의 게르마늄이 잔류하였으며, 2회 처리의 경우 잎이 21.3%, 줄기가 1.1%, 뿌리가 0.003%, 쌀겨가 2.0% 현미가 0.77% (백미 0.20%)로서 총 게르마늄의 25.2%가 흡수되고 토양 내에 74.8%의 게르마늄이 잔류하였고, 3회 처리의 경우 잎이 36.8%, 줄기가 1.1%, 뿌리가 0.004%, 쌀겨가 3.4% 현미가 1.32% (백미 0.35%)로서 총 게르마늄의 42.7%가 흡수되고 토양 내에 57.3%의 게르마늄이 잔류하는 경향으로 전반적으로 게르마늄 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 게르마늄 흡수율이 증가하였다.

Ge-132 처리구에서 게르마늄 토양처리 횟수에 따른 게르마늄 흡수율은 1회 처리의 경우 잎이 3.8%, 줄기가 1.3%, 뿌리가 0.003%, 쌀겨가 0.9% 및 현미가 0.19% (백미 0.08%)로서 총 게르마늄의 6.2%가 흡수되고 토양 내에 93.8%의 게르마늄이 잔류하였으며, 2회 처리의 경우 잎이 3.0%, 줄기가 0.9%, 뿌리가 0.003%, 쌀겨가 0.7% 현미가 0.16% (백미 0.08%)로서 총 게르마늄의 4.8%가 흡수되고 토양 내에 95.2%의 게르마늄이 잔류하였고, 3회 처리의 경우 잎이 5.5%, 줄기가 0.9%, 뿌리가 0.004%, 쌀겨가 0.4% 현미가 0.09% (백미 0.04%)로서 총 게르마늄의 6.8%가 흡수되고 토양 내에 93.2%의 게르마늄이 잔류하는 경향으로 전반적으로 게르마늄 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없었고, 게르마늄 흡수가 GeO<sub>2</sub> 처리구에 비해 매우 적었다.

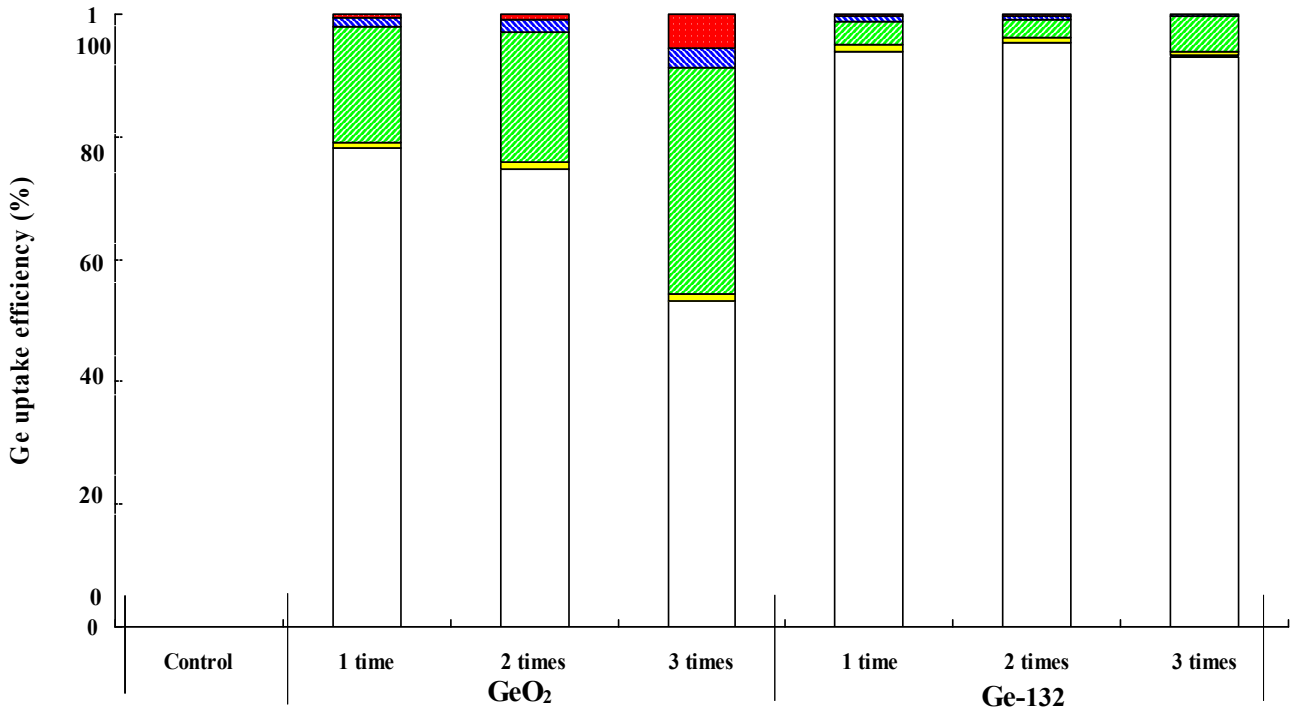


Fig. 2-46. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율 비교.

□ : Residual,      ■ : Root,      ■ : Stem,  
 ▨ : Leaf,      ▩ : Rice bran,      ▤ : Brown rice (Polish rice).

(라) 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 쌀 미질 특성

게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 쌀의 미질 특성을 조사한 결과 Table 2-69에서 보는 바와 같이 전반적으로 게르마늄 종류별 및 토양처리 횟수별에 따라 별 차이 없이 비슷한 경향이였다.

단백질 함량은 GeO<sub>2</sub> 및 Ge-132 처리구가 각각 9.7-10.3 및 8.2~9.1%로 GeO<sub>2</sub> 처리구가 약간 높았고, Amylose 함량은 GeO<sub>2</sub> 및 Ge-132 처리구가 각각 15.0~16.4 및 18.4-29.2%로 Ge-132 처리구가 약간 더 높았다. 또한 알칼리붕괴도는 Ge-132 처리구가 GeO<sub>2</sub> 처리구에 비해 좋았고, 쌀의 소화온도는 모든 처리구에서 전반적으로 별 차이 없이 낮았으며, 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수별 쌀의 심복백은 모든 처리에서 거의 없었다. 쌀 중 질소 함량은 GeO<sub>2</sub> 및 Ge-132 처리구가 각각 1.63-1.70 및 1.38-1.52%로 GeO<sub>2</sub> 처리구가 약간 높았고, 쌀 중 인 함량은 GeO<sub>2</sub> 및 Ge-132 처리구가 각각 106.0-110.6 및 74.4-96.0 eq로 GeO<sub>2</sub> 처리구가 더 높았으며, 쌀 중 마그네슘 함량은 GeO<sub>2</sub> 및 Ge-132 처리구가 각각 60.0-67.1 및 40.9-47.4 eq로 GeO<sub>2</sub> 처리구가 높았다. 따라서 쌀의 미질은 전반적으로 GeO<sub>2</sub> 처리구가 Ge-132 처리구에 비해 약간 좋았다.

Table 2-69. 게르마늄 토양처리 횟수에 따른 쌀의 미질 특징

Treat- ment	Time	WhiteCore & Velly	Alkiline degree	Gelatinization temperature	Amylose Contents	Protein Contents	N	P	Mg
		(0-9)	(1-7)	Low/High	------(%)-----		--(eq)--		
Control		0/1	4	Low	21.6	9.3	1.56	101.6	57.1
	1	0/1	3	Low	16.4	10.3	1.70	106.0	60.0
GeO <sub>2</sub>	2	0/1	2	Low	15.6	9.9	1.66	108.7	65.1
	3	0/1	1	Low	15.0	9.7	1.63	110.6	67.1
	1	0/1	6	Low	18.4	8.2	1.38	74.4	40.9
Ge-132	2	0/1	5	Low	21.4	9.1	1.52	90.7	47.4
	3	0/1	5	Low	29.2	9.1	1.52	96.0	45.9

⑤ 최적 게르마늄 및 토양처리 횟수 선정

최적 품종, 토성 및 게르마늄 처리방법 하에서 최적 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수를 선정하기 위해 벼의 생육상황, 생산량, 게르마늄 저항성 및 쌀의 미질 등의 일반적인 특성과 게르마늄 흡수 특성을 전체적으로 동시에 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 2-47~2-48에서 보는 바와 같다.

게르마늄 종류별 벼의 일반적인 특성을 비교한 결과 무기게르마늄인 GeO<sub>2</sub> 처리구에서 단백질, amylose 함량 및 생산량 등은 Ge-132 처리구에 비해 좋았으나, 게르마늄 독성이 심하였다. 게르마늄 종류별 게르마늄 흡수특성을 비교한 결과 GeO<sub>2</sub> 처리구가 Ge-132 처리구에 비해 전반적으로 매우 높은 함량을 보였다. 따라서 최적 게르마늄 종류는 무기게르마늄인 GeO<sub>2</sub>이었다.

게르마늄 토양처리 횟수별 벼의 일반적인 특성을 비교한 결과 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 모든 토양처리 횟수에서 단백질, amylose 및 천립중 등은 별 차이 없었으나, 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 쌀의 생산량이 약간 증가하였고, Ge-132 처리구의 경우 모든 항목에서 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없었다. 게르마늄 토양처리 횟수별 게르마늄 흡수특성을 비교한 결과 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우는 토양처리 횟수가 증가함에 따라 게르마늄 함량이 점점 증가하는 경향이었고, Ge-132 처리구의 경우는 처리횟수에 따라 별 차이 없었다.

이상의 결과에서 쌀에 게르마늄을 효과적으로 흡수시키기 위한 최적 게르마늄은 GeO<sub>2</sub>이었고, 최적 게르마늄 토양처리 횟수는 3회이었다.

따라서 게르마늄 흡수량 증대를 위한 최적 품종은 호평벼이었고, 최적 토성은 미사질양토이었고, 최적 처리방법은 게르마늄의 토양처리이었고, 최적 게르마늄은 무기게르마늄인 GeO<sub>2</sub>이었고, 최적 토양처리 횟수는 3회이었다. 하지만 게르마늄의 토양처리 횟수별 쌀의 게르마늄 함량은 벼 이앙 전 토양에 게르마늄 동량을 사전 처리한 상기 (2) (나) 항의 게르마늄 처리방법별 게르마늄 흡수특성 조사 결과와 비교해 볼 때 약간 높았으나, 쌀 생산량은 오히려 급격히 감소하였다. 따라서 게르마늄의 토양처리는 벼 이앙전 토양에 게르마늄을 주입하는 방법이 바

람직 할 것으로 판단된다. 따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀을 효과적으로 생산하기 위해서는 미사질양토에 무기게르마늄 ( $\text{GeO}_2$ )을 주입한 후 최적 품종인 호평벼를 이앙하여 재배해야 할 것으로 사료된다.

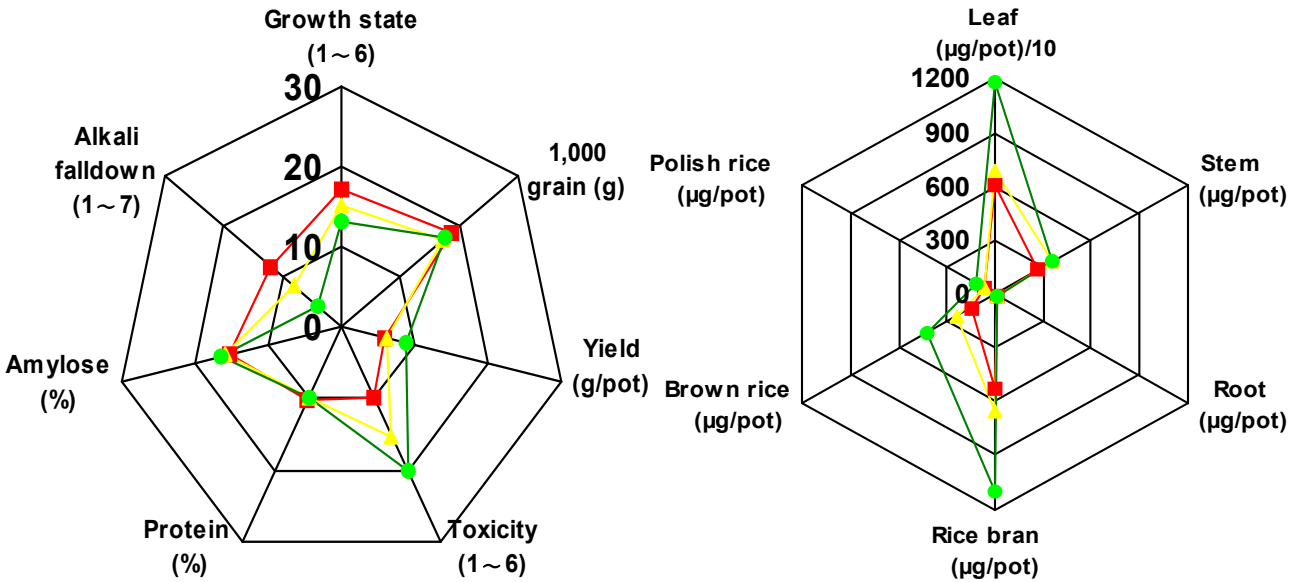


Fig. 2-47.  $\text{GeO}_2$ 에서 토양처리 횟수에 따른 벼의 일반적인 특성과 게르마늄 흡수특성.

■ : 1 time, ▲ : 2 times, ● : 3 times.

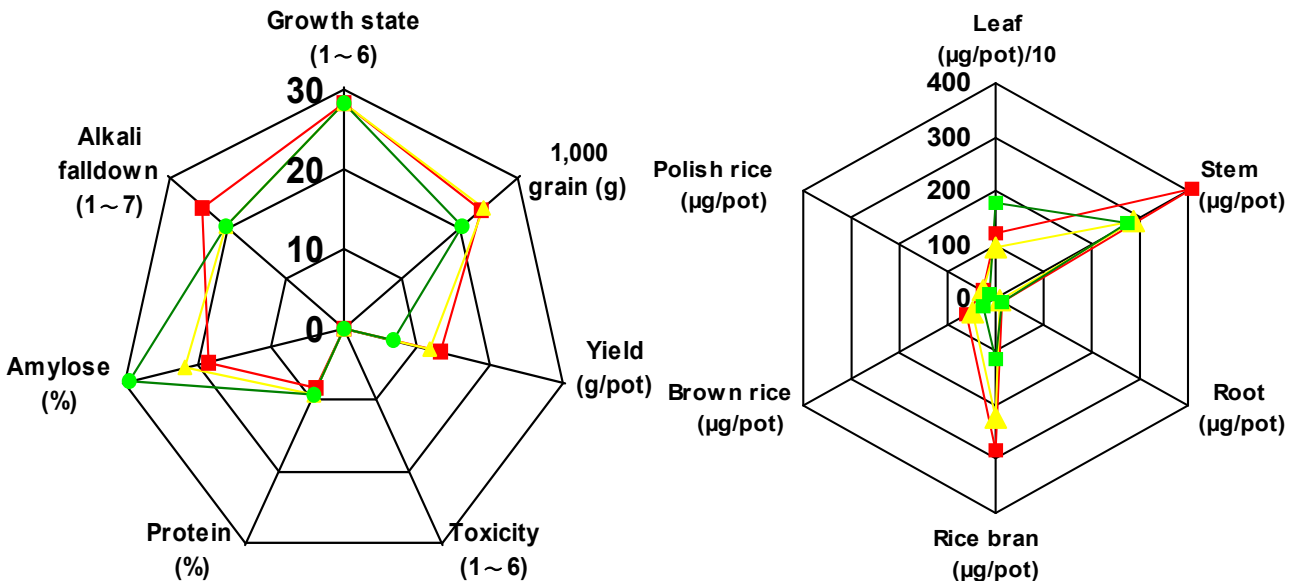


Fig. 2-48. Ge-132에서 토양처리 횟수에 따른 벼의 일반적인 특성과 게르마늄 흡수특성.

■ : 1 time, ▲ : 2 times, ● : 3 times.

### 3. 연구결과 요약

게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술을 개발하기 위해 1차년도에 게르마늄함유 친환경농자재 및 기능성 농산물 생산기술 개발을 위한 기초연구결과를 바탕으로 게르마늄 흡수량 증대를 위

한 재배법을 개발하고자 하였다. 우선 최적 품종을 선정하기 위해 호평, 주남, 일미 및 동진벼의 4품종에서 게르마늄 무처리, 토양처리 및 엽면처리로 구분하여 벼 품종별 벼의 생육특성, 벼 품종별 토양 중 무기성분 함량 변화, 벼 품종에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성 및 벼 품종에 따른 쌀 미질 특성을 각각 조사하였고 이들 결과를 이용하여 최적 품종을 선정하였다. 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배조건을 구명하기 위해 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성 조사에서의 최적 품종 하에서 토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성, 게르마늄 처리방법별 벼의 게르마늄 흡수 특성 및 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 게르마늄 흡수 특성을 벼의 생육특성, 토양 중 무기성분 함량 변화, 게르마늄 흡수특성 및 쌀 미질 특성으로 나누어 각각 조사하였으며, 이들 결과를 이용하여 최적 토성, 게르마늄 처리방법, 게르마늄 종류 및 게르마늄 토양처리횟수를 선정하였다.

최적 품종 선정을 위한 벼 품종별 게르마늄 흡수 특성을 조사한 결과 벼의 생육은 호평벼가 타 품종에 비해 전반적으로 양호하였으며, 게르마늄 무처리와 토양처리시 벼의 생육은 엽면처리에 비해 양호하였다. 벼의 품종에 따른 쌀 생산량은 게르마늄 무처리구와 토양처리의 경우 호평 ≍ 주남 > 일미 ≧ 동진벼 순이었으며, 엽면처리의 경우 주남 > 일미 ≍ 호평 ≧ 동진벼 순이었다. 또한 쌀 생산량은 전반적으로 게르마늄 무처리 > 토양처리 > 엽면처리 순이었다. 벼 품종별 현미 중 게르마늄 함량은 게르마늄 무처리의 경우 품종에 따라 별 차이 없이 0.6-1.1 mg kg<sup>-1</sup> 정도로 거의 검출되지 않았고, 토양처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 14.5, 8.0, 11.6 및 10.4 mg kg<sup>-1</sup>로 호평 > 일미 > 동진 > 주남 순이었으며, 엽면처리의 경우 호평, 주남, 일미 및 동진벼가 각각 14.5, 11.8, 11.8 및 12.9 mg kg<sup>-1</sup>로 호평 > 동진 > 주남 ≍ 일미 순이었다. 벼 품종별 쌀겨 및 백미 중 게르마늄 함량도 현미와 유사한 경향이였다. 호평벼에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 토양처리의 경우 잎이 19.7%, 줄기가 3.1%, 뿌리가 0.006%, 쌀겨가 2.3% 및 현미가 0.43% (백미 0.25%)로서 전체 게르마늄의 총 25.5%가 흡수되고 토양 내에 74.5%의 게르마늄이 잔류하였으며, 엽면처리의 경우 잎이 25.3%, 줄기가 1.2%, 뿌리가 0.006%, 쌀겨가 2.4% 현미가 0.29% (백미 0.23%)로서 전체 게르마늄의 총 29.2%가 흡수되고 토양 내에 70.8%의 게르마늄이 잔류하였으며, 다른 품종에서도 비슷한 경향이였다. 게르마늄의 흡수율은 전반적으로 엽면처리가 토양처리에 비해 높았으나 실제 주식으로 사용되는 현미나 백미 중의 게르마늄 흡수율은 토양처리가 엽면처리에 비해 거의 2배정도 높았다. 따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀을 생산하기 위해서는 현미나 백미 중 게르마늄 흡수량을 증대시켜야 하므로 게르마늄 토양처리가 엽면처리에 비해 적합할 것으로 판단된다. 벼 품종에 따른 쌀의 미질은 게르마늄 처리유무와 처리방법에 따라 별 차이 없었으며, 전반적으로 호평벼가 타 품종에 비해 가장 좋은 미질을 보였다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 품종은 호평벼이었다. 따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀을 효과적으로 생산하기 위해서는 호평벼를 재배하여야 할 것으로 판단된다.

최적 토성을 선정하기 위해 토성별 벼의 게르마늄 흡수 특성을 조사한 결과 벼의 생육은 모든 토성에서 별 차이 없이 전반적으로 양호하였으며, 토성별 쌀 생산량은 전반적으로 미사질양



토 > 식양토 > 양토 > 사양토 순이었다. 토성에 따른 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 쌀겨의 경우 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토가 각각 980, 868, 754 및 803  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 미사질양토가 다른 토성에 비해 가장 높았으며, 현미의 경우 전반적으로 미사질양토 > 사양토 > 식양토 > 양토 순으로 미사질양토가 140  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 백미의 경우도 현미와 비슷한 경향이였다. 미사질양토에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 잎이 19.7%, 줄기가 2.3%, 뿌리가 0.03%, 쌀겨가 3.1% 및 현미가 0.44% (백미 0.25%)로서 총 게르마늄의 25.8%가 흡수되고 토양내에 74.2%의 게르마늄이 잔류하였으며, 다른 토성도 비슷한 경향이였다. 토성에 따른 쌀의 미질은 토성에 따라 별 차이 없었으며, 전반적으로 미사질양토가 타 품종에 비해 가장 좋은 미질을 보였다. 따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 토성은 미사질양토이었다.

최적 게르마늄 처리방법을 선정하기 위해 게르마늄 처리방법별 벼의 게르마늄 흡수 특성을 조사한 결과 벼의 생육은 토양처리 및 토양·엽면 동시처리의 경우 양호한 성장을 보였으나, 엽면처리는 다른 조건에 비해 성장이 저조하였다. 게르마늄 처리방법별 쌀 생산량은 전반적으로 토양처리 > 토양·엽면 동시처리  $\approx$  엽면처리 순이었다. 게르마늄 처리방법에 따른 게르마늄 흡수량은 쌀겨의 경우 토양처리가 타 처리에 비해 가장 높은 결과를 보였으며, 현미의 경우 토양처리, 엽면처리 및 토양·엽면 동시처리가 각각 140, 91 및 146  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 토양처리와 토양·엽면 동시처리가 엽면처리에 비해 높은 결과를 보였고, 백미의 경우 모든 처리에서 62-79  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 정도로 게르마늄 처리방법에 따라 별 차이 없었다. 토양처리에서 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 잎이 19.7%, 줄기가 2.3%, 뿌리가 0.003%, 쌀겨가 3.1% 현미가 0.44% (백미 0.25%)로서 총 게르마늄의 25.8%가 흡수되고 토양내에 74.2%의 게르마늄이 잔류하였다. 엽면처리와 토양·엽면 동시처리의 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 토양처리와 비슷한 경향이였으나, 현미나 백미 중 게르마늄 함량은 토양처리가 가장 높았다. 쌀의 미질은 게르마늄 처리방법에 따라 전반적으로 별 차이 없었으나, 토양처리가 다른 처리에 비해 미미하게 좋은 경향이였다. 따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 게르마늄 처리방법은 토양처리이었다.

최적 게르마늄과 토양처리 횟수를 선정하기 위해 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 벼의 게르마늄 흡수 특성을 조사한 결과  $\text{GeO}_2$  처리구가 Ge-132 처리구에 비해 생육이 저조하였으며,  $\text{GeO}_2$  처리구 모두에서 게르마늄 독성으로 인해 잎 표면에 갈색 반점이 나타났다. 게르마늄 종류별 쌀 생산량은 Ge-132 처리구가  $\text{GeO}_2$  처리구에 비해 많았으며, 토양처리 횟수별 쌀 생산량은 전반적으로  $\text{GeO}_2$  처리구의 경우 3회 > 2회 > 1회 순이었으며, Ge-132 처리구의 경우 별 차이 없었다. 게르마늄 토양처리 횟수에 따른 현미의 게르마늄 흡수량은  $\text{GeO}_2$ 의 경우 1회, 2회 및 3회가 각각 151, 245 및 425  $\mu\text{g pot}^{-1}$ 로 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 점점 증가하는 경향이였고, Ge-132 처리구의 경우  $\text{GeO}_2$  처리구에 비해 흡수량이 매우 적었으며, 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 미미하게 감소하는 경향이였다. 게르마늄 토양처리 횟수에 따른 백미와 쌀겨의 게르마늄 흡수량은 전반적으로 현미와 비슷한 경향이였으며, 백미의 게르마늄의 흡수량은 현미에 비해 적었다.  $\text{GeO}_2$  처리구에서 게르마늄 토양처리 횟수에 따른 게르마늄 흡수율은 1회 처리의 경우 잎이 18.8%, 줄기가 0.8%, 뿌리가 0.002%, 쌀겨가 1.6% 및 현미가

0.47% (백미 0.23%)로서 총 게르마늄의 21.7%가 흡수되고 토양 내에 78.3%의 게르마늄이 잔류하였으며, 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 모든 부위에서 게르마늄 흡수율이 증가하였다. Ge-132 처리구에서 게르마늄의 흡수율은 게르마늄 토양처리 횟수에 따라 별 차이가 없었다. 쌀의 미질은 전반적으로 GeO<sub>2</sub> 처리구가 Ge-132 처리구에 비해 약간 좋았다. 따라서 쌀에 게르마늄을 효과적으로 흡수시키기 위한 최적 게르마늄은 GeO<sub>2</sub>이었고, 최적 게르마늄 토양처리 횟수는 3회이었다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 게르마늄 흡수량 증대를 위한 최적 품종은 호평벼이었고, 최적 토성은 미사질양토이었으며, 최적 처리방법은 게르마늄의 토양처리이었고, 최적 게르마늄은 무기게르마늄인 GeO<sub>2</sub>이었으며, 최적 토양처리 횟수는 3회이었다. 하지만 게르마늄의 토양처리 횟수별 쌀의 게르마늄 함량은 벼 이앙 전 토양에 게르마늄 동량을 사전 처리한 결과와 비교해 볼 때 약간 높았으나, 쌀 생산량은 오히려 급격히 감소하였다. 그러므로 게르마늄의 토양처리 는 벼 이앙 전 토양에 게르마늄을 주입하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

따라서 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술 개발을 위한 최적 재배법은 미사질양토에 무기게르마늄 (GeO<sub>2</sub>)을 8 mg kg<sup>-1</sup>되게 주입한 후 최적 품종인 호평벼를 이앙하여 재배하는 방법이 었다. 또한 게르마늄이 함유된 쌀을 효과적으로 섭취하기 위해서는 도정공정을 줄인 현미가 백미보다 좋을 것으로 판단되며, 효과적으로 벼에 흡수된 유기게르마늄을 섭취하기 위해서는 게르마늄이 많이 함유된 쌀겨를 가공식품 등에 활용할 수 있는 방안이 필요할 것으로 사료된다.

### III. 게르마늄 함유 기능성 쌀 생산기술 실용화

#### 1. 재료 및 방법

##### 가. 공시 재료

##### (1) 공시 토양

벼 재배 시험은 경남 진주시 초전동에 위치한 경상남도 농업기술원 내의 벼 시험 포장에서 실시하였으며, 벼 시험 포장내의 공시 토양은 국제토양학회 분류기준에 의해 분석한 결과 미사 질양토이었다. 이는 1-2차년도 토성별 게르마늄 흡수특성 연구에서 선정한 최적토성과 일치하였다. 공시 토양의 이화학적 특성은 Table 2-70에서 보는 바와 같고, 토성은 Table 2-71에서 보는 바와 같이 모래, 미사 및 점토가 각각 82.4, 15.3 및 2.3%이었다.

Table 2-70. 공시 토양의 이화학적 특성

pH (1:5 H <sub>2</sub> O)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	O.M. (g kg <sup>-1</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	SiO <sub>2</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	Ex.Cat (cmol+ kg <sup>-1</sup> )			
					K	Ca	Mg	Na
5.9	0.49	3.7	299.8	204.5	0.11	6.29	0.64	0.08

Table 2-71. 공시 토양의 토성

Soil texture <sup>¶</sup>	Sand	Silt	Clay
	------(%)-----		
Silt loam	82.4	15.3	2.3

¶국제토양학회 분류기준.

##### (2) 공시 벼

공시 벼는 Table 2-72에서 보는 바와 같이 1-2차년도 연구결과 최적품종인 호평벼를 사용하였으며, 초장 약 12 cm 정도인 어린모를 2008년 6월 20일에 경상남도 농업기술원내 벼 시험포장에 이양하여 2008년 10월 20일에 수확하였다.

Table 2-72 공시 벼의 주요특징

Rice	Quality	Disease tolerance	Adaptability	Used	Remark
Hopyung	고품질, 밥맛양호	도열병, 흰잎마름병	이양재배용	밥쌀용	속색양호

##### (3) 공시 게르마늄

게르마늄함유 기능성 농산물 재배기술 실용화를 위한 현장시험에 사용된 공시 게르마늄은 GeO<sub>2</sub> 및 1차년도 게르마늄함유 농자재 개발 연구를 통해 만든 수도작용 액상게르마늄을 각각

사용하였다. 벼 재배시험 사용된  $\text{GeO}_2$ 는 물에 녹여 액상으로 조제한 후 사용하였고, 수도작용 액상게르마늄은  $6000 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 조제된 것을 희석한 후 사용하였다.

나. 실험방법

게르마늄 종류에 따른 벼의 게르마늄 흡수 특성 조사는 1-2차년도 pot시험에서 검증된 최적 품종, 최적 토성 및 최적 게르마늄 처리방법 등을 현장에 적용하여 적용성을 검증하고 개발된 기술을 실용화하기 위해 게르마늄 종류를 1차년도 연구에서 개발한 게르마늄 함유 농자재인 수도작용 액상 게르마늄과  $\text{GeO}_2$ 를 사용하여 시험하였다.

게르마늄 종류에 따른 벼의 게르마늄 흡수 특성은 농업기술원내 벼 재배포장을 Fig. 2-48에서 보는 바와 같이 각 구획마다  $3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 로서  $12 \text{ m}^2$ 의 면적을 1구획으로 하여 총 9개 시험구로 구분하였으며, 각 시험구는 각 처리구간에 영향이 최대한 적도록 분할구배치법으로 3반복하였다. 게르마늄은 수도작용 게르마늄과  $\text{GeO}_2$ 를 적당한 농도로 희석하여 벼 이앙 직전에 토양에 최종농도가  $8 \text{ mg kg}^{-1}$ 되게 주입한 후 혼합하였다. 각 시험구에 호평벼를 300주씩 모내기하였다. 시비는 농업과학기술원 작물별 시비처방 기준에 따른 표준시비량으로  $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O} = 12-3-3 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$  ( $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O} = 1.44-0.36-0.36 \text{ kg m}^{-2}$ )되게 시비하였다. N,  $\text{P}_2\text{O}_5$  및  $\text{K}_2\text{O}$ 의 시비에는 각각 요소, 용과린 및 염화칼리 비료를 사용하였다. 질소와 칼리의 분시비율은 밀거름, 분얼비, 수비 및 실비를 각각 50, 20, 20 및 10%로 하였으며, 관수 및 기타재배는 관행재배법에 준하였다.

상기 조건하에서 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육특성, 게르마늄 종류에 따른 토양 중 무기성분 함량 변화, 게르마늄 종류에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성, 게르마늄 종류에 따른 쌀미질 특성을 각각 조사하였다.

무처리구 ③	$\text{GeO}_2$ 처리구 ③	수도작용 액상게르마늄 처리구 ③
무처리구 ②	$\text{GeO}_2$ 처리구 ②	수도작용 액상게르마늄 처리구 ②
무처리구 ①	$\text{GeO}_2$ 처리구 ①	수도작용 액상게르마늄 처리구 ①

Fig. 2-48. 벼 재배를 위한 시험구 배치 모식도.

### (1) 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육특성

게르마늄 종류에 따른 벼의 생육특성 조사는 벼 이앙 후, 최고분얼기, 수잉기 및 출수기에 벼의 초장, 분얼수 및 잎수를 각각 조사하였고, 쌀 수확 후에 수장, 간장, 천립중, 총립수, T/R 율, 생체중량, 건조중량 및 수수를 각각 조사하였다.

### (2) 게르마늄 종류에 따른 토양 중 무기성분 함량 변화

게르마늄 종류에 따른 토양 중 무기성분 함량 조사는 벼 수확 후 토양 중 T-N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub>, K, Ca, Mg 및 Na 함량을 각각 조사하였다.

### (3) 게르마늄 종류에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성

#### (가) 벼 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 함량조사는 벼를 잎, 줄기 및 뿌리로 각각 나누어 각 부위별 게르마늄 함량을 조사하였다. 또한 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 상기 조사된 벼 부위별 게르마늄 함량에 건물중을 고려하여 게르마늄 흡수량을 계산하였다.

#### (나) 쌀 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

게르마늄 종류에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량조사는 쌀을 쌀겨, 현미 및 백미로 각각 나누어 각 부위별 게르마늄 함량을 조사하였다. 또한 쌀 부위별 게르마늄 흡수량은 상기 조사된 쌀 부위별 게르마늄 함량에 부위별 쌀 생산량을 고려하여 게르마늄 흡수량을 계산하였다.

#### (다) 게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율 비교

게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 게르마늄 주입량에 대한 벼의 잎, 줄기, 뿌리, 쌀겨, 현미 및 백미에 흡수된 게르마늄 흡수량의 비율을 조사하여 비교하였다.

### (4) 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 쌀 미질 특성

게르마늄 종류에 따른 쌀 미질 특성을 조사하기 위해 벼 수확 후 벼의 품종별 쌀의 심복백, 알카리붕괴도, 호화온도, 아밀로스, 단백질, 질소, 인 및 마그네슘 함량을 각각 조사하였다.

### (5) 게르마늄 종류에 따른 게르마늄 쌀 품질 비교

게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 게르마늄을 선정하기 위해 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육상황, 생산량, 게르마늄 저항성 및 쌀의 미질 등의 일반적인 특성과 부위별 게르마늄 흡수 특성을 전체적으로 비교하였다.

## 다. 조사시기

게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술의 실용화를 위해 경상남도 농업기술원내 벼 재배포장에서

재배 시험을 2008년 6월 20일부터 2008년 10월 20일까지 실시하였다.

벼의 생육조사는 최고분얼기인 벼 이앙 후 15일 (2008년 7월 5일), 수잉기인 벼 이앙 후 45일 (2008년 8월 5일) 및 출수기인 벼 이앙 후 95일 (2008년 9월 24일)에 각 처리 조건별로 실시하였으며, 조사항목은 초장, 분얼수 및 잎수를 각각 조사하였다.

벼의 수확은 벼 이앙 후 121일 (수확; 2008년 10월 20일)에 실시하였으며, 벼 수확 후 생육조사는 각 처리 조건별로 농촌진흥청 농작물 생육조사에 관한 규정에 의해 수장, 간장, 천립중, 총립수, T/R율, 생체중량, 건조중량 및 수수를 각각 조사하였다.

#### 라. 분석방법

토양의 토성분석은 비중계법을 이용하여 토양 무기질 입자 중 모래·미사·점토의 백분율을 산출하여 국제토양학회에서 제작한 삼각도표법을 이용하여 조사하였고, 토양의 화학성분 분석은 농촌진흥청 농업과학기술원의 토양 및 식물체분석법에 준하여 pH는 초자전극법, EC는 EC meter (Orion, Model 160, Germany)로 분석하였으며, 유기물은 Tyurin법, T-N은 Kjeldahl법, 유효인산은 Lancaster법, 유효규산은 NaOAc법, 치환성 양이온은 1N-Ammonium acetate (pH 7.0) 침출법으로 각각 분석하였다. 토양 중 게르마늄분석은 가용성 침출액으로 널리 사용되는 0.1N-HCl을 사용하여 30°C에서 1시간 침출하여 여과한 후 Inductively coupled plasma (ICP) spectrometer [Atomscan25 (TJA), OPTIMA 5300DV (Perkin elmer)]를 사용하였다.

식물체 분석을 위한 시료는 열풍건조기로 80°C에서 건조하여 40 mesh 이하로 분쇄한 후 사용하였다. 식물체 분석은 농업과학기술원의 토양 및 식물체분석법에 준하여 시료를 습식분해액으로 분해시킨 여액을 필요에 따라 희석하여 T-N은 Kjeldahl법, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>는 Vanado-molybdate법으로 분석하였으며, 무기성분은 Atomic absorption spectrophotometer (AA-SCAN8)로 분석하였으며, 게르마늄은 Inductively coupled plasma (ICP) spectrometer [Atomscan25 (TJA), OPTIMA 5300DV (PerkinElmer)] 및 ICP-MS로 분석하였다.

쌀 미질조사는 농촌진흥청 농사시험 연구조사 기준에 준하여 벼를 수확하여 탈곡한 후 실험실용 현미기를 이용하여 도정하였으며, 도정된 백미는 Cyclone sample mill을 이용하여 쌀가루로 분쇄한 후 100 mesh 체에 통과시켜 분석시료로 사용하였다. 아밀로스 함량은 요오드비색정량법으로 분석하였고, 단백질 함량은 쌀가루 0.4 g을 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액으로 습식분해시켜 Kjeldahl 증류법에 의해 조단백질 함량을 구한 후 단백질 환산계수 5.95를 곱하여 구하였으며, 심복백은 관능검사를 9단계로 나누어 분석하였고, 알카리붕괴도는 KOH 1.4%에서 24시간 침지 후 관능검사를 7단계로 나누어 분석하였으며, 질소 함량은 분해 후 Kjeldahl 증류법으로 하였고, 인 함량은 분해 후 Vanadate molybdate법으로 하였고, Mg 함량은 분해 후 Atomic absorption spectrophotometer (AA-SCAN8)로 분석하였다.

## 2. 결과 및 고찰

### 가. 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육특성

게르마늄 종류에 따른 벼의 게르마늄 흡수 특성 조사는 1-2차년도 pot시험에서 검증된 최적 품종, 최적 토성 및 최적 게르마늄 처리방법 등을 현장에 적용하여 적용성을 검증하고 개발된 기술을 실용화하기 위해 게르마늄 종류를 1차년도 연구에서 개발한 게르마늄 함유 농자재인 수도작용 액상 게르마늄과  $\text{GeO}_2$ 를 사용하여 시험하였다. 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육 특성, 게르마늄 종류에 따른 토양 중 무기성분 함량 변화, 게르마늄 종류에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성, 게르마늄 종류에 따른 쌀 미질 특성을 각각 조사하였다.

게르마늄 종류에 따른 벼의 생육특성은 Fig. 2-49, Table 2-73~2-74에서 보는 바와 같이 게르마늄 종류에 따른 벼의 초장은  $\text{GeO}_2$  처리구가 무처리구와 수도작용 액상게르마늄 처리구에 비해 초장이 약간 짧았다. 또한 모든 조건에서 벼의 초장은 전반적으로 생육시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향으로 특히 최대분얼기 이후에 급격히 증가하는 경향이였다. 게르마늄 종류별 벼의 초장, 잎수 및 분얼수는 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없었으며, 게르마늄을 처리한 두처리구 모두 무처리구에 비해 약간 적은 경향이였다.

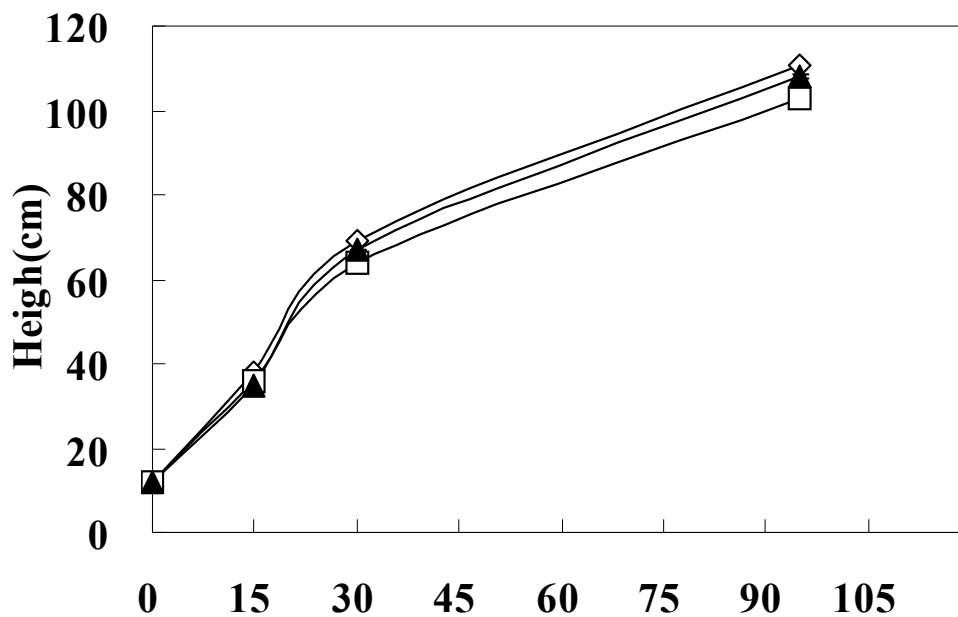


Fig. 2-49. 게르마늄 종류에 따른 초장변화. Error bars represent SD (n = 6).

◇ : Control, □ :  $\text{GeO}_2$ , ▲ : Commercial Ge.

Table 2-73. 게르마늄 종류에 따른 잎수 변화

Treatment Repeated		Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
		(ea plant <sup>-1</sup> )			
Control	I	19.8a*	76.0a	117.8a	101.5a
	II	11.7a	74.0a	115.5a	100.7a
	III	19.5a	74.5a	117.3a	100.8a
	Average	19.7a	74.8a	116.9a	101.0a
GeO <sub>2</sub>	I	19.8a	58.7bc	78.8b	71.3c
	II	20.2a	60.7b	78.3b	71.3c
	III	19.7a	59.0b	78.2b	71.0c
	Average	19.9a	59.4b	78.4b	71.2c
Commercial Ge	I	19.5a	56.0c	78.0b	89.5b
	II	19.8a	54.7c	75.5bc	87.8b
	III	20.0a	56.2c	74.8bc	88.3b
	Average	19.8a	55.6c	75.1bc	88.6b

\*means within a column followed by same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at P=0.05.

Table 2-74. 게르마늄 종류에 따른 분얼수 변화

Treatment Repeated		Transplanting	The highest tiller	Maturity	Heading period
		(ea plant <sup>-1</sup> )			
Control	I	7.0a*	17.2a	35.3a	22.3ab
	II	6.7ab	17.5a	35.0a	25.0a
	III	7.2a	17.3a	35.7a	25.2a
	Average	6.9a	17.3a	35.3a	24.2a
GeO <sub>2</sub>	I	6.8a	14.7b	22.7b	16.7c
	II	7.5a	14.8b	22.2b	15.5c
	III	6.7ab	14.3b	22.3b	15.7c
	Average	7.0a	14.6b	22.4b	15.9c
Commercial Ge	I	7.2a	14.2b	21.0c	17.0bc
	II	6.8a	14.0bc	20.5c	18.3b
	III	7.3a	14.0bc	20.5c	16.5c
	Average	7.1a	14.1bc	20.7c	17.3bc

\*means within a column followed by same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at P=0.05.



게르마늄 종류에 따른 생육상황은 photo. 2-11에서 보는 바와 같이  $\text{GeO}_2$ 와 수도작용 액상게르마늄 처리구는 무처리구에 비해 생육이 약간 저조하였으며, 게르마늄 처리구간에는 큰 차이 없이 유사한 경향이였다. 수확 후 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육특성은 Table 2-75에서 보는 바와 같이  $\text{GeO}_2$ 와 수도작용 액상게르마늄 처리구는 무처리구에 비해 간장, 수장, 수수 및 천립중 등의 생육특성이 약간 저조하였으나 게르마늄 처리구간에는 큰 차이 없이 비슷한 경향이였다.

이앙기 (6월20일)



둑 쌓기



이앙 전 전경



모내기

최고분얼기 (7월5일)



무처리구



GeO<sub>2</sub> 처리구



수도작용 액상게르마늄 처리구

수잉기 (8월5일)



무처리구



GeO<sub>2</sub> 처리구



수도작용 액상게르마늄 처리구

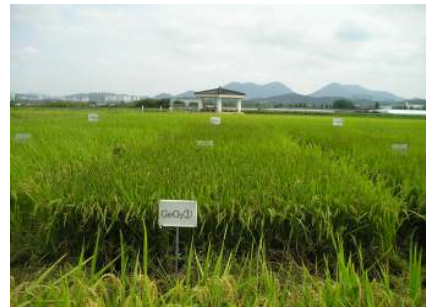
출수기 (9월19일)



무처리구



GeO<sub>2</sub> 처리구



수도작용 액상게르마늄 처리구

Photo. 2-11. 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육상황.

게르마늄 종류에 따른 벼의 생육특성은 Table 2-75에서 보는 바와 같이 GeO<sub>2</sub> 및 수도작용 액상게르마늄 처리구가 무처리구에 비해 약간 낮은 경향이었으나 전반적으로 큰 차이가 없었다. 수도작용 액상게르마늄 처리구의 경우 벼에 게르마늄에 의한 독성이 거의 나타나지 않은 반면에 GeO<sub>2</sub> 처리구에서는 일부 벼에서 게르마늄의 독성이 나타났다. 이는 1차년도 연구에서 개발한 게르마늄 함유 친환경농자재인 수도작용 액상게르마늄의 경우 게르마늄 독성을 저해시키기 위해 SiO<sub>2</sub>를 미량으로 함유하고 있기 때문으로 사료된다. 이들 SiO<sub>2</sub>의 경우 벼 생육의 필수 영양분으로서 독성저해와 영양공급을 동시에 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 이 (2004)에 의하면, 벼에 Ge과 규산질비료를 함께 처리하였을 때 규산질 비료의 양이 증가할수록 쌀 중의 Ge함량은 조금 낮았지만, 초장, 수장 및 수량이 증가하였고, 고농도에서 Ge에 의한 벼의 생육 저해는 크게 줄어든 것으로 보고되었다.

게르마늄 종류별 쌀 생산량은 Fig. 2-50에서 보는 바와 같이 전반적으로 게르마늄을 처리하지 않은 무처리구가 게르마늄 처리구에 비해 약간 높은 결과를 보였다. 또한 GeO<sub>2</sub> 처리구의 쌀 생산량은 수도작용 액상게르마늄 처리구에 비해 약간 저조하였다.

Table 2-75. 게르마늄 종류별 벼의 생육특성

Treatment	Repeated	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	No. panicle per hill	No. grain per panicle	1,000 grain (g)	T/R ratio
Control	I	61.9a*	17.2b	23.8ab	78.7ab	22.3a	2.4a
	II	60.9a	17.4ab	23.2ab	76.0b	22.4a	2.4a
	III	61.6a	17.2b	24.7a	86.3a	22.4a	2.3a
	Average	61.5a	17.6a	23.9ab	80.3ab	22.4a	2.4a
GeO <sub>2</sub>	I	54.9b	16.9b	17.8c	77.0ab	21.6b	2.3a
	II	55.1b	17.4ab	18.8bc	85.0a	21.3b	2.3a
	III	55.1b	16.9b	21.2b	82.3ab	21.8b	2.2a
	Average	55.0b	17.0b	19.3bc	81.4ab	21.6b	2.2a
Commercial Ge	I	56.6b	17.8a	18.0c	70.7c	21.7b	2.4a
	II	57.4ab	17.4ab	16.5d	72.8bc	20.3c	2.3a
	III	56.7b	17.0b	18.3c	76.3b	21.1b	2.3a
	Average	56.9b	17.4ab	17.6cd	73.3bc	21.0b	2.4a

\*means within a column followed by same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at P=0.05.

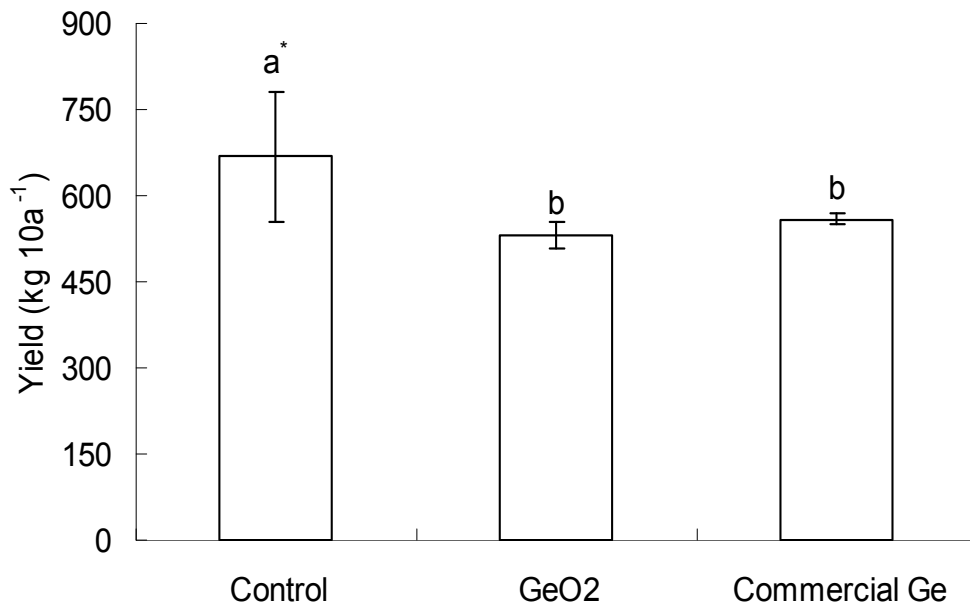


Fig. 2-50. 게르마늄 종류에 따른 쌀 생산량. \*means within a column followed by same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at P=0.05.

나. 게르마늄 종류에 따른 토양 중 무기성분 함량 변화

토양 중 무기성분 함량은 Table 2-76에서 보는 바와 같다. 게르마늄 처리구의 토양 중 T-N 함량은 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이 391.6-392.6 mg kg<sup>-1</sup>으로 무처리구의 평균 385.8 mg kg<sup>-1</sup>에 비해 유의성 있게 높았다. 게르마늄 처리구의 토양 중 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 함량은 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이 512.1-513.2 mg kg<sup>-1</sup>으로 무처리구의 평균 516.1 mg kg<sup>-1</sup>에 비해 유의성 있게 낮았다. 토양 중 SiO<sub>2</sub>, K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 모든 처리구에서 전반적으로 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이 유사한 경향이였다.

Table 2-76. 게르마늄 종류에 따른 토양 중 무기성분 함량

Treatment Repeated	T-N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Ex.Cat (cmol+ kg <sup>-1</sup> )				
	(mg kg <sup>-1</sup> )			K	Ca	Mg	Na	
Control	I	390.5a*	515.3a	163.5ab	1.4a	5.7a	0.4a	0.3b
	II	392.2a	517.8a	156.3b	1.4a	5.6a	0.4a	0.4a
	III	374.7b	515.2a	161.2b	1.5a	5.6a	0.4a	0.4a
	Average	385.8ab	516.1a	160.3b	1.4a	5.6a	0.4a	0.4a
GeO <sub>2</sub>	I	389.8a	508.7b	157.8b	1.4a	5.5a	0.3b	0.4a
	II	393.3a	513.5a	159.3b	1.4a	5.6a	0.4a	0.3b
	III	394.7a	514.0a	160.2b	1.4a	5.6a	0.4a	0.3b
	Average	392.6a	512.1ab	159.1b	1.4a	5.6a	0.4a	0.4a
Commercial Ge	I	394.0a	511.8ab	155.5c	1.5a	5.5a	0.4a	0.4a
	II	383.8ab	514.7a	174.3a	1.5a	5.6a	0.4a	0.4a
	III	396.8a	513.0ab	157.2b	1.4a	5.7a	0.4a	0.4a
	Average	391.6a	513.2a	162.3b	1.4a	5.6a	0.4a	0.4a

\*means within a column followed by same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at P=0.05.

다. 게르마늄 종류에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성

(1) 벼 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

게르마늄 종류에 따른 벼의 건물중량 및 게르마늄 함량은 Table 2-77에서 보는 바와 같다. 벼의 건물중량은 게르마늄 종류에 따라 다소 차이는 있으나 전반적으로 무처리구 > GeO<sub>2</sub> 처리구 > 수도작용 액상게르마늄 처리구 순이었다.

게르마늄 종류에 따른 잎과 줄기의 게르마늄 함량은 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 각각 평균 807.3 및 143.4 mg kg<sup>-1</sup> 정도로 수도작용 액상게르마늄 처리구에 비해 월등히 많았고, 뿌리의 게르마늄 함량은 GeO<sub>2</sub> 및 수도작용 액상게르마늄 처리구의 경우 각각 평균 2.3 및 1.3 mg kg<sup>-1</sup>로 게르마늄 종류에 따라 차이는 있었으나 잎과 줄기에 비해 그 함량이 매우 적었다.

Table 2-77. 게르마늄 종류에 따른 건물중량과 게르마늄 함량

Treatment	Repeated	Dry weight (g m <sup>-2</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
		Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
Control	I	241.7a*	181.7a	175.0ab	: 0.8c	1.0c	0.4c
	II	249.6a	179.2a	176.7ab	: 0.8c	1.1c	0.4c
	III	251.7a	167.1b	180.4a	: 0.7c	1.1c	0.3c
	Average	247.6a	176.0a	177.4a	: 0.8c	1.0c	0.4c
GeO <sub>2</sub>	I	217.1b	174.2ab	172.5b	: 796.7a	142.6a	2.1a
	II	227.9ab	172.1ab	177.1a	: 826.0a	137.4a	2.4a
	III	214.6b	172.5ab	178.3a	: 799.2a	150.1a	2.3a
	Average	219.9b	172.9ab	176.0ab	: 807.3a	143.4a	2.3a
Commercial Ge	I	232.9ab	170.0b	170.8b	: 126.8b	41.2b	1.2b
	II	229.6ab	174.2ab	176.7ab	: 125.7b	44.9b	1.7ab
	III	224.6ab	173.8ab	168.8b	: 127.8b	43.2b	1.1b
	Average	229.0ab	172.6ab	172.1b	: 126.8b	43.1b	1.3b

\*means within a column followed by same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at P=0.05.

게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 Fig. 2-51에서 보는 바와 같다. 잎의 게르마늄 흡수량은 GeO<sub>2</sub> 처리구에서 평균 177.0 µg m<sup>-2</sup>로 수도작용 액상게르마늄 처리구보다 약 6배 높았다.

게르마늄 종류에 따른 줄기의 게르마늄 흡수량은 잎과 비슷한 경향으로 전반적으로 큰 차이는 없었으나 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 평균 24.8 µg m<sup>-2</sup>로 수도작용 액상게르마늄 처리구보다 약간 높았다. 게르마늄 종류에 따른 뿌리의 게르마늄 흡수량은 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 평균 0.4 µg m<sup>-2</sup>정도이었고, 수도작용 액상게르마늄 처리구의 경우도 비슷한 경향이었다.

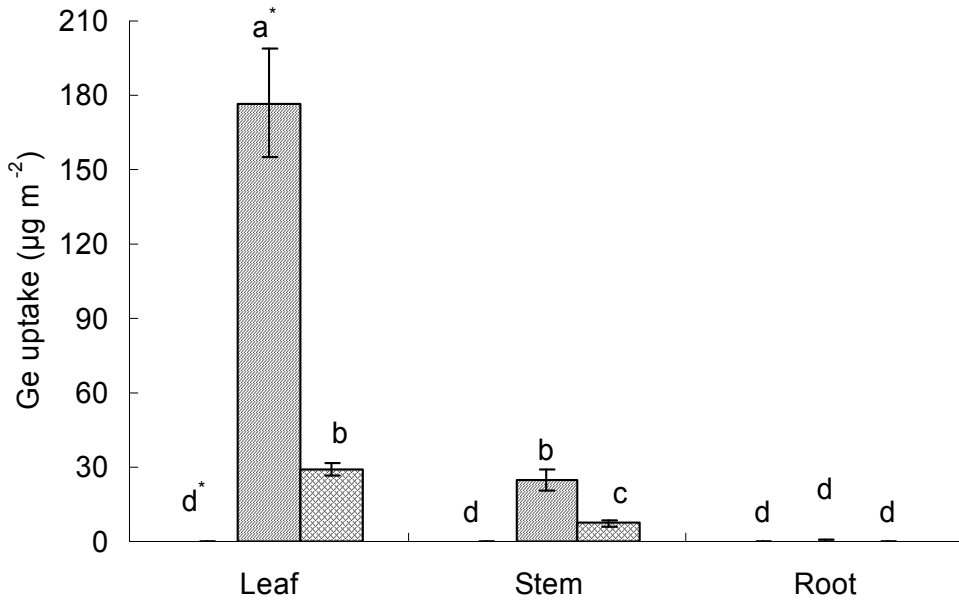


Fig. 2-51. 게르마늄 종류에 따른 벼의 게르마늄 흡수량. \* means within a column followed by same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at P=0.05.

□ : Control,    ▨ : GeO<sub>2</sub>,    ▩ : Commercial Ge.

(2) 쌀 부위별 게르마늄 함량 및 흡수량

쌀 생산량은 Table 2-78에서 보는 바와 같이 게르마늄 종류에 따라 다소 차이는 있으나 전반적으로 현미 > 백미 > 쌀겨 순이었다. 게르마늄 종류에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량은 Table 2-78에서 보는 바와 같다. 게르마늄 종류에 따른 쌀겨 중 게르마늄 함량은 GeO<sub>2</sub> 처리구 및 수도작용 액상게르마늄 처리구에서 각각 평균 526.1 및 506.7 mg kg<sup>-1</sup>으로 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이 비슷한 경향이였다. 게르마늄 종류에 따른 현미 중 게르마늄 함량은 GeO<sub>2</sub> 처리구에서 평균 40.9 mg kg<sup>-1</sup>으로 수도작용 액상게르마늄 처리구의 평균 31.1 mg kg<sup>-1</sup>보다 유의성 있게 높았다. 하지만 무처리구에서 현미 중 게르마늄 함량은 평균 0.5 mg kg<sup>-1</sup>으로 거의 자연함유량 수준으로 검출되어 게르마늄 처리구들에 비해 매우 적은 함량을 보였다.

게르마늄 종류에 따른 백미 중 게르마늄 함량은 GeO<sub>2</sub> 처리구에서 평균 7.9 mg kg<sup>-1</sup>으로 수도작용 액상게르마늄 처리구의 평균 14.3 mg kg<sup>-1</sup>보다 유의성 있게 낮았다.

Table 2-78. 게르마늄 종류별 쌀의 생산량과 게르마늄 함량

Treatment Repeated	Yield (g m <sup>-2</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )				
	Rice	bran	Brown rice	Polished rice	Rice	bran	Brown rice	Polished rice
Control	I	79.2a*	335.4a	306.7a	:	2.0b	0.5c	0.3c
	II	76.3a	325.4a	300.4a	:	2.4b	0.5c	0.3c
	III	75.4a	331.3a	301.3a	:	2.2b	0.5c	0.3c
	Average	76.9a	330.7a	302.8a	:	2.2b	0.5c	0.3c
GeO <sub>2</sub>	I	67.1bc	241.3b	232.1c	:	525.5a	40.4a	8.5b
	II	66.7c	251.3b	231.7c	:	522.8a	38.0a	7.6b
	III	65.4c	238.3b	226.7c	:	530.2a	44.3a	7.5b
	Average	66.4c	243.6b	230.1c	:	526.1a	40.9a	7.9b
Commercial Ge	I	70.4b	256.7b	246.7b	:	514.5a	30.1b	14.3a
	II	67.5bc	257.5b	249.2b	:	494.0a	30.4b	13.9a
	III	68.3b	251.3b	245.8b	:	511.5a	32.7b	14.6a
	Average	68.8b	255.1b	247.2b	:	506.7a	31.1b	14.3a

\*means within a column followed by same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at P=0.05.

게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량은 Fig. 2-52에서 보는 바와 같다. 게르마늄 종류에 따른 쌀겨의 게르마늄 흡수량은 GeO<sub>2</sub> 처리구 및 수도작용 액상게르마늄 처리구에서 각각 34.9 및 34.9  $\mu\text{g m}^{-2}$ 로 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없었다.

게르마늄 종류에 따른 현미의 게르마늄 흡수량은 쌀겨와 비슷한 경향으로 전반적으로 큰 차이는 없었으나 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 평균 9.9  $\mu\text{g m}^{-2}$ 로 수도작용 액상게르마늄 처리구보다 약간 높았다.

게르마늄 종류에 따른 뿌리의 게르마늄 흡수량은 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 평균 1.8  $\mu\text{g m}^{-2}$  정도로 수도작용 액상게르마늄 처리구의 평균 3.5  $\mu\text{g m}^{-2}$  보다 낮은 경향이였다.



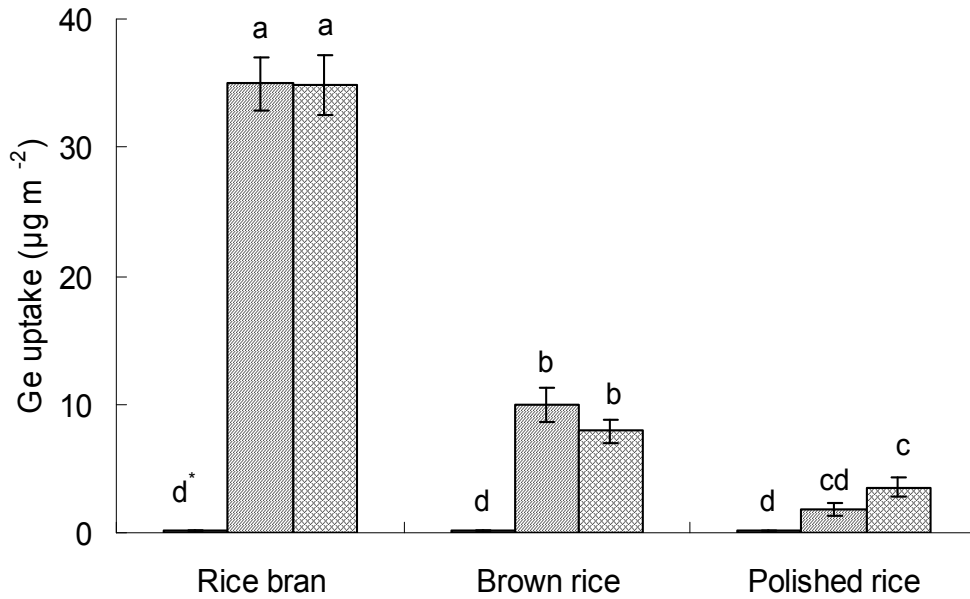


Fig. 2-52. 게르마늄 종류별 쌀의 흡수량. \* means within a column followed by same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at P=0.05.

□ : Control,      ▨ : GeO<sub>2</sub>,      ▩ : Commercial Ge.

(3) 게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율 비교

게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 Fig. 2-53에서 보는 바와 같이 전반적으로 잎 > 쌀겨 > 현미(백미) > 줄기 > 뿌리 순으로 앞에서 가장 높았다.

게르마늄 종류에 따른 게르마늄 흡수율은 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 잎이 11.1%, 줄기가 1.6%, 뿌리가 0.03%, 쌀겨가 2.2% 및 현미가 0.73% (백미 0.11%)로서 총 게르마늄의 15.56%가 흡수되고 84.4%의 게르마늄이 토양 내에 잔류하거나 유실되었다.

수도작용 액상게르마늄 처리구의 경우 잎이 1.8%, 줄기가 0.46%, 뿌리가 0.01%, 쌀겨가 2.2% 및 현미가 0.71% (백미 0.22%)로서 총 게르마늄의 5.19%가 흡수되고 94.8%의 게르마늄이 토양 내에 잔류하거나 유실되는 경향으로 전반적으로 게르마늄 종류에 따른 게르마늄 흡수율은 GeO<sub>2</sub>를 처리구가 수도작용 액상게르마늄 처리구에 비해 매우 높았다.

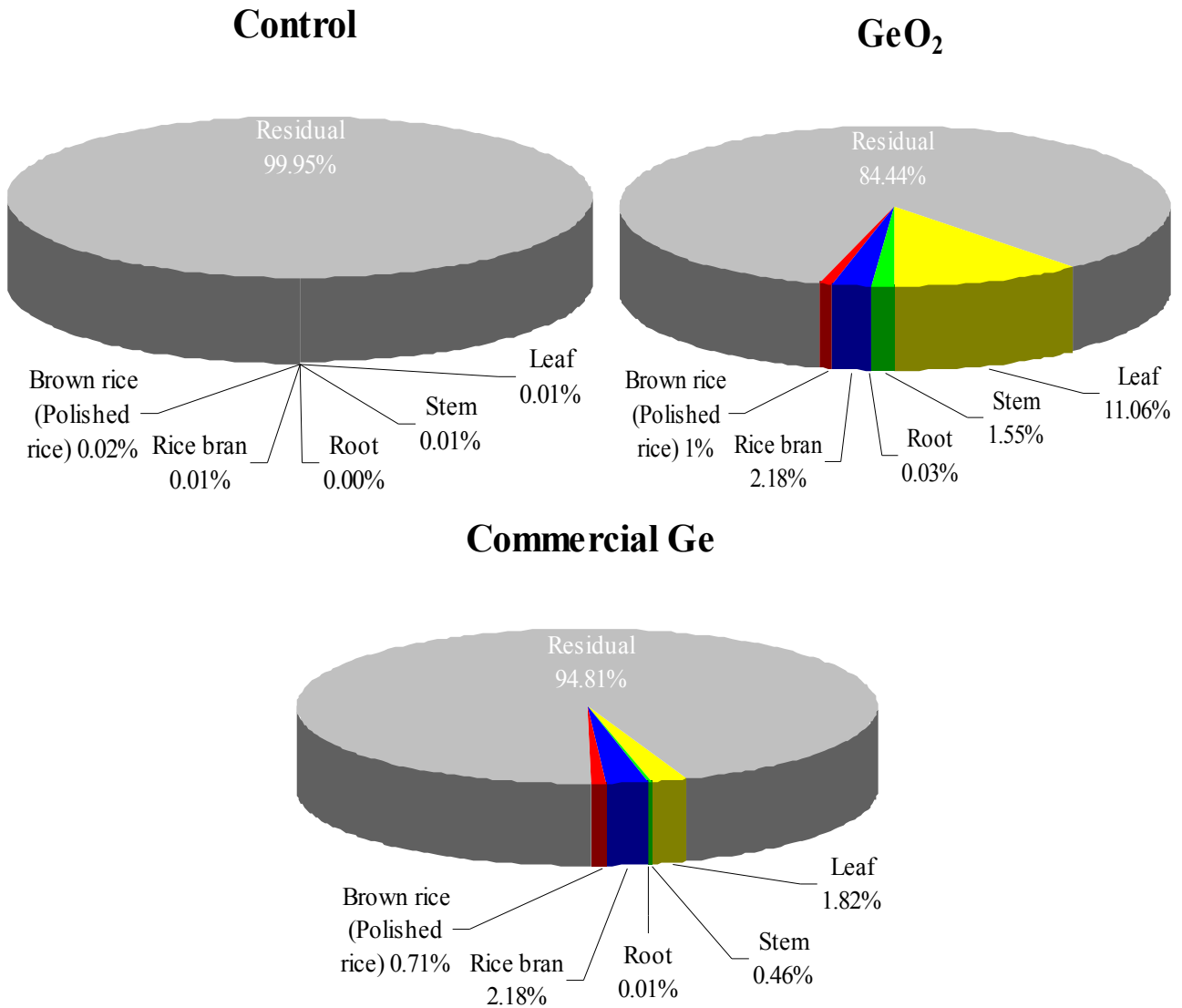


Fig. 2-53. 게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율 비교.

#### 라. 게르마늄 종류에 따른 쌀 미질 특성

게르마늄 종류에 따른 쌀의 미질 특성을 조사한 결과 Table 2-79에서 보는 바와 같이 단백질 함량은 GeO<sub>2</sub> 및 수도작용 액상게르마늄 처리구가 모두 평균 8.6%로 무처리구의 평균 10.0%에 비해 약간 낮았고, Amylose 함량은 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이 15.9-22.1%로 무처리구의 평균 23.6%에 비해 약간 낮았다. 또한 알칼리붕괴도 및 쌀의 소화온도는 모든 처리구에서 전반적으로 별 차이 없었으며, 쌀의 심복백은 모든 처리구에서 거의 없었다. 쌀 중 질소 함량은 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이 1.2-1.3%로 무처리구의 평균 1.5%에 비해 약간 낮았고, 쌀 중 인 함량 또한 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이 87.0-96.6 eq로 무처리구의 평균 103.7 eq에 비해 낮았다. 쌀 중 마그네슘 함량은 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이 48.8-52.2 eq로 무처리구의 평균 59.4 eq에 비해 낮았다. 따라서 쌀의 미질은 전반적으로 게르마늄 종류에 따라 별차이 없었으나 무처리구에 비해 약간 낮은 경향을 나타내었다.

Table 2-79. 게르마늄 종류에 따른 쌀의 미질 특징

Treatment	Repeated	WhiteCore	Alkiline	Gelatinization	Amylose	Protein	N	P	Mg
		& Velly	degree	temperature	Contents	Contents			
		(0-9)	(1-7)	Low/High	------(%)-----		--(eq)--		
Control	I	0/1	4	Low	23.9	10.0	1.5a	104.4a	60.2a
	II	0/1	4	Low	23.9	10.1	1.5a	103.1a	58.2a
	III	0/1	4	Low	22.9	10.0	1.5a	103.5a	60.0a
	Average	0/1	4	Low	23.6	10.0	1.5a	103.7a	59.4a
GeO <sub>2</sub>	I	0/1	4	Low	21.6	8.9	1.3b	97.0b	52.3b
	II	0/1	4	Low	21.0	8.2	1.4ab	95.1b	53.9ab
	III	0/1	3	Low	20.9	8.7	1.2b	97.6b	50.3b
	Average	0/1	4	Low	21.2	8.6	1.3b	96.6b	52.2b
Commercial Ge	I	0/1	5	Low	15.9	8.7	1.2b	89.8c	45.4b
	II	0/1	4	Low	15.7	8.7	1.2b	88.2c	53.8ab
	III	0/1	4	Low	16.0	8.5	1.1b	83.2c	47.1b
	Average	0/1	4	Low	15.9	8.6	1.2b	87.0c	48.8b

\*means within a column followed by same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at P=0.05.

마. 게르마늄 종류에 따른 게르마늄 쌀 품질 비교

게르마늄 종류에 따른 게르마늄 쌀 품질을 비교하기 위해 1-2차년도 pot실험에서 구명한 최적 품종, 토성 및 게르마늄 처리방법 하에서 벼의 생육상황, 생산량, 게르마늄 저항성 및 쌀의 미질 등의 일반적인 특성과 게르마늄 흡수 특성을 전체적으로 동시에 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 2-54에서 보는 바와 같다.

게르마늄 종류별 벼의 일반적인 특성을 비교한 결과 무기게르마늄인 GeO<sub>2</sub> 처리구에서 단백질, amylose 함량 및 생산량 등은 수도작용 액상게르마늄 처리구에 비해 좋았으나, 게르마늄 독성이 심하였다. 게르마늄 종류별 게르마늄 흡수특성을 비교한 결과 GeO<sub>2</sub> 처리구와 수도작용 액상게르마늄 처리구는 전반적으로 큰 차이 없이 비슷하였다.

이상의 결과를 종합적으로 고려해 볼 때, 수도작용 액상게르마늄의 경우 식용으로 가장 많이 사용되는 백미 중 게르마늄 함량이 GeO<sub>2</sub>에 비해 높았으나, 현미와 쌀겨를 포함한 쌀 전체의 게르마늄 흡수량은 GeO<sub>2</sub>가 수도작용 액상게르마늄에 비해 높았다. 하지만 GeO<sub>2</sub>의 경우 일부 벼에서 독성이 수도작용 액상게르마늄에 비해 심하였다. 따라서 벼의 생육과 게르마늄 흡수 모두를 안정적으로 만족시키기 위해서는 1차년도 연구에서 개발한 게르마늄 함유 친환경농자재인 수도작용 액상게르마늄이 효과적일 것으로 판단된다.

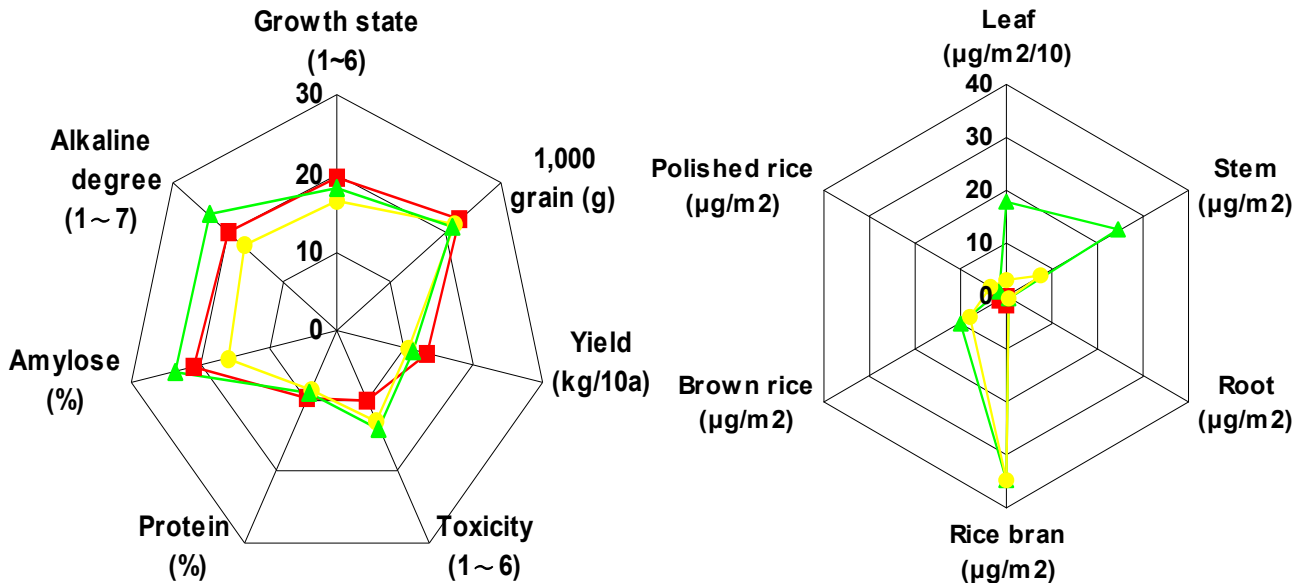


Fig. 2-54. 게르마늄 종류에 따른 벼의 일반적인 특성과 게르마늄 흡수특성.

■ : Control, ▲ : GeO<sub>2</sub>, ● : Commercial Ge.

### 3. 연구결과 요약

1-2차년도 pot시험에서 검증된 최적 품종, 최적 토성 및 최적 게르마늄 처리방법 등을 현장에 적용하여 적용성을 검증하고 개발된 기술을 실용화하기 위해 게르마늄 종류를 1차년도 연구에서 개발한 게르마늄 함유 농자재인 수도작용 액상 게르마늄과 GeO<sub>2</sub>를 사용하여 게르마늄 종류에 따른 벼의 생육특성, 게르마늄 종류에 따른 토양 중 무기성분 함량 변화, 게르마늄 종류에 따른 부위별 게르마늄 흡수 특성, 게르마늄 종류에 따른 쌀 미질 특성을 각각 조사하였다.

게르마늄 종류에 따른 벼의 생육특성을 조사한 결과 게르마늄 종류에 따른 벼의 초장은 GeO<sub>2</sub> 처리구가 무처리구와 수도작용 액상게르마늄 처리구에 비해 초장이 약간 짧았다. 또한 모든 조건에서 벼의 초장은 전반적으로 생육시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향으로 특히 최대분얼기 이후에 급격히 증가하는 경향이였다. 게르마늄 종류별 벼의 초장, 잎수 및 분얼수는 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없었으며, 게르마늄을 처리한 두처리구 모두 무처리구에 비해 약간 적은 경향이였다. 수도작용 액상게르마늄 처리구의 경우 벼에 게르마늄에 의한 독성이 거의 나타나지 않은 반면에 GeO<sub>2</sub> 처리구에서는 일부 벼에서 게르마늄의 독성이 나타났다. 수확 후 게르마늄 종류에 따른 간장, 수장, 수수 및 천립중 등의 생육특성은 GeO<sub>2</sub>와 수도작용 액상게르마늄 처리구가 무처리구에 비해 약간 저조하였으나 게르마늄 처리구간에는 큰 차이 없이 비슷한 경향이였다. 게르마늄 종류별 쌀 생산량은 전반적으로 게르마늄을 처리하지 않은 무처리구가 게르마늄 처리구에 비해 약간 높은 결과를 보였다. 또한 GeO<sub>2</sub> 처리구의 쌀 생산량은 수도작용 액상게르마늄 처리구에 비해 약간 저조하였다.

토양 중 무기성분 함량을 조사한 결과 게르마늄 처리구의 토양 중 T-N 함량은 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이 391.6-392.6 mg kg<sup>-1</sup>으로 무처리구의 평균 385.8 mg kg<sup>-1</sup>에 비해 유

의성 있게 높았으나, SiO<sub>2</sub>, K, Ca, Mg 및 Na 등의 함량은 모든 처리구에서 전반적으로 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이 유사한 경향이였다.

벼의 건물중량은 게르마늄 종류에 따라 다소 차이는 있으나 전반적으로 무처리구 > GeO<sub>2</sub> 처리구 > 수도작용 액상게르마늄 처리구 순이었다.

게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수량을 조사한 결과 잎의 게르마늄 흡수량은 GeO<sub>2</sub> 처리구에서 평균 177.0 µg m<sup>-2</sup>로 수도작용 액상게르마늄 처리구보다 약 6배 높았다. 줄기의 게르마늄 흡수량은 잎과 비슷한 경향으로 전반적으로 큰 차이는 없었으나 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 평균 24.8 µg m<sup>-2</sup>로 수도작용 액상게르마늄 처리구보다 약간 높았으나, 뿌리의 경우 게르마늄 처리구간에 큰 차이 없었다.

쌀 생산량은 게르마늄 종류에 따라 다소 차이는 있으나 전반적으로 현미 > 백미 > 쌀겨 순이었다. 게르마늄 종류에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량을 조사한 결과 쌀겨 중 게르마늄 함량은 GeO<sub>2</sub> 처리구 및 수도작용 액상게르마늄 처리구 모두 별 차이 없이 비슷한 경향이었고, 현미 중 게르마늄 함량은 GeO<sub>2</sub> 처리구에서 평균 40.9 mg kg<sup>-1</sup>으로 수도작용 액상게르마늄 처리구의 평균 31.1 mg kg<sup>-1</sup>보다 유의성 있게 높았다. 하지만 백미 중 게르마늄 함량은 GeO<sub>2</sub> 처리구에서 평균 7.9 mg kg<sup>-1</sup>으로 수도작용 액상게르마늄 처리구의 평균 14.3 mg kg<sup>-1</sup>보다 유의성 있게 낮았다. 게르마늄 종류에 따른 벼 부위별 게르마늄 흡수율은 전반적으로 잎 > 쌀겨 > 현미(백미) > 줄기 > 뿌리 순으로 잎에서 가장 높았다.

GeO<sub>2</sub> 처리구의 게르마늄 흡수율은 잎이 11.1%, 줄기가 1.6%, 뿌리가 0.03%, 쌀겨가 2.2% 및 현미가 0.73% (백미 0.11%)로서 총 게르마늄의 15.56%가 흡수되고 84.4%의 게르마늄이 토양 내에 잔류하거나 유실되었다. 수도작용 액상게르마늄 처리구의 게르마늄 흡수율은 잎이 1.8%, 줄기가 0.46%, 뿌리가 0.01%, 쌀겨가 2.2% 및 현미가 0.71% (백미 0.22%)로서 총 게르마늄의 5.19%가 흡수되고 94.8%의 게르마늄이 토양 내에 잔류하거나 유실되는 경향으로 전반적으로 게르마늄 종류에 따른 게르마늄 흡수율은 GeO<sub>2</sub>를 처리구가 수도작용 액상게르마늄 처리구에 비해 약간 높았다. 게르마늄 종류에 따른 쌀의 미질은 전반적으로 게르마늄 종류에 따라 별 차이 없이 모든 조건에서 좋은 미질을 보였다.

이상의 결과를 종합적으로 고려해 볼 때, 수도작용 액상게르마늄의 경우 식용으로 가장 많이 사용되는 백미 중 게르마늄 함량이 GeO<sub>2</sub>에 비해 높았으나, 현미와 쌀겨를 포함한 쌀 전체의 게르마늄 흡수량은 GeO<sub>2</sub>가 수도작용 액상게르마늄에 비해 높았다. 하지만 GeO<sub>2</sub>의 경우 일부 벼에서 독성이 수도작용 액상게르마늄에 비해 심하였다. 따라서 벼의 생육과 게르마늄 흡수 모두를 안정적으로 만족시키기 위해서는 1차년도 연구에서 개발한 게르마늄 함유 친환경농자재인 수도작용 액상게르마늄이 효과적일 것으로 판단된다.

#### IV. 게르마늄함유 기능성 쌀 생산을 위한 벼재배 매뉴얼

게르마늄함유 기능성 쌀 생산을 위한 벼재배 매뉴얼은 2006년 농림부 농림기술개발 연구과제의 일환으로 수행된 “게르마늄 함유 친환경 농자재 및 기능성농산물 생산기술 개발”연구결과를 토대로 작성되었다. 본 매뉴얼은 게르마늄함유 기능성 쌀 생산을 목적으로 서술되어 기존 관행재배의 일반적인 내용은 기술하지 않았다. 따라서 본 매뉴얼은 무기게르마늄을 토양시비나 엽면시비를 통해 게르마늄함유 쌀을 생산하는 재배방법을 대상으로 한다. 본 매뉴얼작성에 사용된 벼 재배매뉴얼은 농자재중 게르마늄에만 적용이 가능하며, 다른 농자재에 적용시 충분한 검토 후에 사용되어야 할 것이다.

본 매뉴얼은 게르마늄함유 기능성 쌀 생산을 위한 벼 재배 매뉴얼로 농자재중 게르마늄만을 대상으로 한 것으로 벼 재배의 경우 지역별, 토성별 등의 환경조건이 다르므로 본 매뉴얼의 일괄적인 적용보다는 대상 지역주변의 환경요인을 충분히 고려하여 적용하는 것이 바람직하다. 본 매뉴얼에서 제시하지 못한 게르마늄 사례들의 세부적인 결과들은 본 보고서내의 세부적인 연구결과를 참고하고, 본 매뉴얼에서 제시하고 있는 내용에 대한 이론적인 근거는 “참고문헌”을 통해서 얻도록 한다.

##### 1. 벼 품종 선정

벼 품종의 선택은 수도재배에서 가장 중요한 부분의 하나로 파종시기, 시비량, 도복의 정도, 병해충저항성 정도, 수확량에 이르기까지 이 모든 것이 결정된다 해도 과하지 않을 것이다.

일반적인 관행재배 품종선택에 있어서 고려해야할 사항은 품종의 적응지역, 시비량, 병해충 등 재배특성에 주의하여 선택하고, 가뭄 상습지에는 적기파종 늦심기에 강한 품종 선택, 소득작물 후작지에서는 단기성 품종을 선택하고 앞 작물 잔류 질소질 비료가 많으므로 포장 여건을 감안 감량 시비하여야 한다. 도복 상습지는 도복에 강한 내도복성 품종을 선택하고, 병해 발생상습지는 내병·충성이 강한 품종 선택하는데, 본 매뉴얼에서 다루고 있는 게르마늄함유 쌀 생산을 위해서는 게르마늄 독성에 대한 저항성이 강한 품종을 선택해야 한다. 아래에 엽면처리와 토양처리시 최적 벼 품종을 선정하였다. 단 본 최적 품종은 시험된 품종에 한한다.

##### 가. 엽면처리시 벼 품종 선정

Ge 엽면처리시 최적 품종을 선정하기 위한 벼 품종에 따른 쌀 부위별 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-80에서 보는 바와 같다. 벼 품종별 쌀의 생산량은 전반적으로 벼 품종에 따라 별 차이 없이 현미 ≒ 백미 > 쌀겨 순으로 높았다. 벼 품종에 따른 게르마늄 함량은 쌀겨의 경우 호평, 주남, 동진 및 일미벼가 각각 548.2, 421.0, 281.5 및 402.6 mg kg<sup>-1</sup>로 호평벼에서 특히 높았으며, 현미의 경우 호평, 주남, 동진 및 일미벼가 각각 14.5, 11.8, 11.8 및 12.9 mg kg<sup>-1</sup>로 호평벼가 다른 품종에 비해 가장 높은 결과를 보였고, 백미의 경우 호평, 주남, 동진 및 일미벼가 각각 11.0, 10.0, 3.5 및 9.3 mg kg<sup>-1</sup>로 현미와 비슷한 경향으로 호평벼가 다른 품종에

비해 가장 높은 결과를 보였다. 따라서 각 농가에서 게르마늄 쌀을 생산에 적합한 품종을 선정하고자 한다면, Ge 함량을 극대화 할 수 있는 호평벼를 이양하여 재배하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

Table 2-80. Ge 엽면처리시 벼 품종에 따른 쌀 생산량 및 Ge 함량

Rice	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
Hopyung	1.4±0.2	6.3±0.4	6.2±1.1	548.2±28.1	14.5±1.2	11.6±2.1
Junam	1.9±0.2	8.4±0.7	8.3±0.7	421.0±19.5	11.8±2.6	10.0±5.0
Ilmee	1.5±0.2	6.6±0.7	6.5±0.7	281.5±25.8	11.8±3.6	3.5±3.0
Dongjin	1.8±0.2	8.0±0.8	7.9±1.0	402.6±15.3	12.9±2.8	9.3±2.7

Ge : GeO<sub>2</sub>, 토성 : 미사질양토, 처리농도 : 8 mg kg<sup>-1</sup>,

Data represent mean ± SD (n = 6).

#### 나. 토양처리시 벼 품종 선정

Ge 토양처리시 최적품종을 선정하기 위한 벼 품종에 따른 쌀 부위별 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-81에서 보는 바와 같다. 벼 품종별 쌀의 생산량은 전반적으로 벼 품종에 따라 별 차이 없이 현미 ≒ 백미 > 쌀겨 순으로 높았다. 벼 품종에 따른 게르마늄 함량은 쌀겨의 경우 호평, 주남, 동진 및 일미벼가 각각 457.2, 366.4, 349.9 및 384.1 mg kg<sup>-1</sup>로 호평벼에서 특히 높았으며, 현미의 경우 호평, 주남, 동진 및 일미벼가 각각 14.5, 8.0, 11.6 및 10.4 mg kg<sup>-1</sup>로 호평벼가 다른 품종에 비해 가장 높은 결과를 보였고, 백미의 경우 호평, 주남, 동진 및 일미벼가 각각 8.3, 6.5, 5.7 및 7.5 mg kg<sup>-1</sup>로 현미와 비슷한 경향으로 호평벼가 다른 품종에 비해 가장 높은 결과를 보였다. 따라서 각 농가에서 게르마늄 쌀을 생산에 적합한 품종을 선정하고자 한다면, Ge 함량을 극대화 할 수 있는 호평벼를 이양하여 재배하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

Table 2-81. Ge 엽면처리시 벼 품종에 따른 쌀 생산량 및 Ge 함량

Rice	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
Hopyung	2.1±0.1	9.7±0.4	9.5±0.4	457.2±29.8	14.5±1.4	8.3±1.2
Junam	2.1±0.2	9.4±1.1	9.3±1.1	366.4±17.6	8.0±1.2	6.5±0.9
Ilmee	1.8±0.2	7.9±1.0	7.8±0.9	349.9± 8.1	11.6±3.2	5.7±0.5
Dongjin	1.9±0.3	8.3±1.1	8.2±0.8	384.1±10.3	10.4±2.6	7.5±0.7

Ge : GeO<sub>2</sub>, 토성 : 미사질양토, 처리농도 : 8 mg kg<sup>-1</sup>,

Data represent mean ± SD (n = 6).

## 2. 토성 선정

토성선정을 위한 토성에 따른 쌀 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-82에서 보는 바와 같다. 토성별 쌀의 생산량은 전반적으로 토성에 따라 별 차이 없이 현미 > 백미 > 쌀겨 순으로 높았다. 토성에 따른 게르마늄 함량은 쌀겨의 경우 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토가 각각 457, 476, 415 및 451 mg kg<sup>-1</sup>로 모든 토성에서 비슷한 결과를 보였으며, 현미의 경우 미사질양토, 식양토, 양토 및 사양토가 각각 14.5, 13.2, 12.8 및 14.1 mg kg<sup>-1</sup>로 미사질양토가 다른 토성에 비해 가장 높은 결과를 보였고, 백미의 경우 현미와 비슷한 경향으로 미사질양토가 다른 토성에 비해 가장 높은 결과를 보였다. 따라서 쌀에 흡수된 게르마늄은 대부분 쌀 껍질에 분포되어 있었고, 쌀겨와 쌀눈 등이 포함된 현미의 게르마늄 함량은 전반적으로 백미에 비해 높았다. 따라서 각 농가의 토성을 분석한 후 그 토양이 미사질양토일 경우, 게르마늄함유 쌀을 생산하기에 가장 적합할 것으로 판단된다.

Table 2-82. 토성에 따른 쌀의 생산량과 게르마늄 함량

Soil texture	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
Silt loam	2.1±0.1	9.7±0.4	9.5±0.4	457.2±29.8	14.5±1.4	8.3±1.2
Clay loam	1.9±0.1	8.8±0.6	8.6±0.6	476.6±13.8	13.2±5.1	5.1±1.1
Loam	1.8±0.2	8.2±0.9	8.1±0.9	415.3±11.1	12.8±0.9	4.7±1.1
Sandy loam	1.8±0.4	8.0±1.6	7.9±1.6	451.0± 9.2	14.1±0.5	5.3±0.3

Ge : GeO<sub>2</sub>, 품종 : 호평벼, 처리방법 : 이앙 전 토양처리, 처리농도 : 8 mg kg<sup>-1</sup>,

Data represent mean ± SD (n = 6).



### 3. 게르마늄 토양처리 방법

#### 가. 게르마늄 처리농도

게르마늄 토양처리시 게르마늄의 농도는 게르마늄함유 쌀 생산을 위한 재배에 있어서 가장 중요한 요인이라고 할 수 있다. 특히 무기게르마늄은 식물에 대한 독성이 있어서 과다사용시 게르마늄 독성에 의해 생산량이 감소되기 때문에 게르마늄 함량의 조절은 매우 중요하다. Table 2-83에서 보는 바와 같이 게르마늄 농도에 따른 쌀 부위별 생산량 및 게르마늄 함량을 조사한 결과 쌀겨, 현미 및 백미의 pot당 생산량은 게르마늄 함량 증가와 상관없이 유사하였으나, Ge 12 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리한 pot의 경우 약간 적었다. 쌀겨에서는 게르마늄 토양처리 농도가 증가 할수록 게르마늄 함량이 급격히 증가하였으나, 현미 및 백미에서는 게르마늄 토양처리 농도가 증가 할수록 게르마늄 함량이 미미하게 증가하였다. 따라서 Ge함량과 쌀 생산량을 고려해 보았을 때, Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>을 처리하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 하지만 본 게르마늄 처리농도는 호평벼에 한하며, 본 연구진의 선행연구결과 일미벼에서는 게르마늄 2.5 mg kg<sup>-1</sup> 이상에서 게르마늄 독성이 나타나 수량이 감소하였다. 따라서 게르마늄을 이용하여 쌀을 효과적으로 생산하기 위해서는 품종, 토성 등의 환경인자를 모두 고려하여 게르마늄 처리농도를 설정해야 할 것으로 판단된다.

Table 2-83. 게르마늄 토양처리 농도에 따른 쌀 부위별 생산량과 게르마늄 함량

Treatment (mg kg <sup>-1</sup> )	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
Ge 0	2.87	12.9	12.7	0.06	0.002	0.001
Ge 1	1.87	8.43	8.31	3.90	1.82	0.71
Ge 2	3.11	14.0	13.8	58.0	1.97	1.00
Ge 4	2.67	12.0	11.9	106	3.05	1.48
Ge 8	2.33	10.5	10.3	293	6.15	3.14
Ge 12	1.83	8.26	8.15	359	10.2	5.55

Ge : GeO<sub>2</sub>, 품종 : 호평벼, 토성 : 미사질양토, 처리방법 : 이양 전 토양처리.

#### 나. 게르마늄 종류별

게르마늄 종류에 따른 쌀 부위별 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-84에서 보는 바와 같다. 쌀 부위별 생산량은 쌀겨, 현미 및 백미가 각각 1.6-2.0, 7.4-9.0 및 7.3-8.9 g pot<sup>-1</sup>의 범위 이었으며, Ge-132, Ge 표준용액 및 수도작용 액상게르마늄의 경우 생산량이 별 차이 없었으나, GeO<sub>2</sub>의 경우 다른 게르마늄 처리에 비해 생산량이 약간 많았다. 따라서 GeO<sub>2</sub>는 다른 게르마늄에 비해 쌀에 용이하게 흡수되는 것으로 판단된다.

쌀 부위별 게르마늄 함량을 조사한 결과 전반적으로 쌀겨 ≫ 현미 > 백미 순이었으며, 쌀겨에서는 GeO<sub>2</sub>처리가 다른 게르마늄 처리에 비해 매우 높은 함량을 보였고, 현미는 모든 게르마

늪에서 비슷한 함량을 보였다. 백미는 GeO<sub>2</sub>처리가 다른 게르마늄 처리에 비해 약간 높았다. 전반적으로 Ge-132 처리에서 다른 게르마늄 처리에 비해 낮은 게르마늄 함량을 보였다. 이는 Ge-132의 경우 유기게르마늄이기 때문에 식물에 의한 흡수 및 이동이 다른 무기게르마늄에 비해 용이하지 않기 때문으로 사료된다. 따라서 쌀 생산량과 쌀 중 Ge함량을 증대시키기 위해서는 GeO<sub>2</sub>의 사용이 좋을 것으로 판단된다.

Table 2-84. 게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 쌀 부위별 게르마늄 함량

Treatment	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
GeO <sub>2</sub>	2.02	9.08	8.96	57.8	1.73	1.59
Ge-132	1.71	7.69	7.59	24.3	1.33	0.98
Ge standard solution	1.73	7.77	7.67	27.2	1.57	0.99
Commercial Ge	1.65	7.44	7.34	25.7	1.89	1.17

품종 : 호평벼, 토성 : 미사질양토, 처리방법 : 이양 전 토양처리, 처리농도 : 8 mg kg<sup>-1</sup>.

#### 4. 게르마늄 엽면처리 방법

##### 가. 게르마늄 처리농도

게르마늄 엽면처리 농도에 따른 쌀 부위별 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-85에서 보는 바와 같다. 쌀겨, 현미 및 백미의 pot당 생산량은 게르마늄 함량 증가와 상관없이 유사하였으나, Ge 80 mg L<sup>-1</sup>으로 처리한 pot의 경우 약간 적었다. 쌀겨에서는 게르마늄 엽면처리 농도가 증가 할수록 게르마늄 함량이 급격히 증가 하였으나, 현미 및 백미에서는 게르마늄 엽면처리 농도가 증가 할수록 게르마늄 함량이 미미하게 증가 하였다. 특히 게르마늄은 쌀의 껍질에 많이 분포되는 것으로 보이며, 쌀겨와 쌀눈 등이 포함된 현미의 게르마늄 함량이 백미에 비해 높았다. 따라서 쌀을 이용하여 게르마늄을 섭취하려면 되도록 도정공정을 줄인 현미가 좋을 것으로 판단된다.

Table 2-85. 게르마늄 엽면 처리농도에 따른 쌀 부위별 생산량과 게르마늄 함량

Treatment (mg L <sup>-1</sup> )	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
Ge 10	1.94	8.75	8.63	3.07	1.34	1.18
Ge 20	2.02	9.08	8.96	57.8	1.73	1.59
Ge 40	1.74	7.85	7.75	96.3	2.96	2.19
Ge 80	1.63	7.36	7.26	129	5.63	3.80

품종 : 호평벼, 토성 : 미사질양토.

#### 나. 게르마늄 처리횟수

게르마늄 엽면 처리횟수에 따른 쌀 부위별 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-86에서 보는 바와 같다. 쌀겨, 현미 및 백미의 pot당 생산량은 게르마늄 엽면처리 횟수가 증가함에 따라 미미하게 증가하는 경향이였다. 게르마늄 엽면처리 횟수에 따른 게르마늄함량은 전반적으로 쌀겨 ≫ 현미 > 백미 순이였다. 게르마늄 함량은 쌀겨의 경우 게르마늄 엽면처리 횟수가 증가할수록 게르마늄 함량이 급격히 증가하였으나, 현미 및 백미에서는 게르마늄 엽면처리 횟수가 증가할수록 게르마늄 함량이 미미하게 증가하였다. 따라서 엽면처리를 하고자 한다면, 쌀의 게르마늄 함량을 증가시키기 위해서는 게르마늄을 시기별로 나누는 엽면처리가 좋을 것으로 판단된다.

Table 2-86. 게르마늄 엽면 처리횟수에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량조사

Treatment times	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
1	1.89	8.51	8.39	1.55	0.67	0.45
2	1.67	7.53	7.42	2.97	0.87	0.60
3	2.02	9.08	8.96	57.8	1.73	1.59

1: 최고분얼기, 2: 최고분얼기+수잉기, 3: 최고분얼기+수잉기+출수기,

품종 : 호평벼, 토성 : 미사질양토, 처리농도 : 20 mg kg<sup>-1</sup>.

#### 다. 게르마늄 종류별

게르마늄은 1886년 Clemens Winkler가 argyrodite라는 광석에서 최초로 발견한 원소로서 Germania에서 그 어원을 가져 왔다. 게르마늄은 원소주기율표에 C, Si, Sn, Pb와 함께 4A족에 속하는 연성과 전성이 없는 비금속 물질로서 반도체, 컴퓨터 및 전기공학 분야에 널리 사용되어 왔다. 게르마늄은 원자번호 32번, 원자량 72.59, 비중 5.323, 최외각 전자는 4s<sup>2</sup> 4p<sup>2</sup>를 가지며

녹는점 (melting point)과 끓는점 (boiling point)은 각각 937.4, 2,830°C의 화학적 특성을 가지고 있다. 자연상태에서 게르마늄 동위원소의 질량수는 70, 72, 73, 74 및 76 이며 각각 21%, 27%, 8%, 37% 및 8% 정도 존재하고 있다. 게르마늄 (Germanium)은 무기게르마늄과 유기게르마늄으로 분류할 수 있는데, 무기게르마늄 ( $\text{GeO}_2$ )은 인체 내 유입시 빈혈, 신기능장해, 근육장애를 유발하는 것으로 알려져 있으나 (Obara et al., 1991), 유기게르마늄은 항종양 효과 (Jang et al., 1991), 항돌연변이 효과 (Mochizuki and Kada, 1982), natural killer 세포 및 macrophages의 활성화를 포함하는 면역강화 작용 (Suzuki et al., 1986)과 virus 감염의 치료 (Aso et al., 1985) 관절염 치료 효과와 같은 항염증 작용 (Dimartino, 1986), 해열·진통 작용 (Suzuki and Taguchi, 1983), 중금속 해독작용 (Lee and Chung, 1991) 및 운동성 증가 (Ho et al., 1990) 등의 다양한 약리작용을 가지고 있다.

게르마늄 종류에 따른 쌀 부위별 생산량 및 게르마늄 함량은 Table 2-87에서 보는 바와 같이 쌀겨, 현미 및 백미로 나누어 조사하였다. 쌀 부위별 생산량은 쌀겨, 현미 및 백미가 각각 1.6-2.0, 7.4-9.0 및 7.3-8.9 g pot<sup>-1</sup>의 범위이었으며, Ge-132, Ge 표준용액 및 수도작용 액상게르마늄의 경우 생산량이 별 차이 없었으나,  $\text{GeO}_2$ 의 경우 다른 게르마늄 처리에 비해 생산량이 약간 많았다. 따라서  $\text{GeO}_2$ 는 다른 게르마늄에 비해 쌀에 용이하게 흡수되는 것으로 판단된다.

쌀 부위별 게르마늄 함량을 조사한 결과 전반적으로 쌀겨 ≫ 현미 > 백미 순이었으며, 쌀겨에서는  $\text{GeO}_2$ 처리가 다른 게르마늄 처리에 비해 매우 높은 함량을 보였고, 현미는 모든 게르마늄에서 비슷한 함량을 보였다. 백미는  $\text{GeO}_2$ 처리가 다른 게르마늄 처리에 비해 약간 높았다. 전반적으로 Ge-132 처리에서 다른 게르마늄 처리에 비해 낮은 게르마늄 함량을 보였다. 이는 Ge-132의 경우 유기게르마늄이기 때문에 식물에 의한 흡수 및 이동이 다른 무기게르마늄에 비해 용이하지 않기 때문으로 사료된다. 따라서 쌀 생산량과 쌀 중 Ge함량을 증대시키기 위해서는  $\text{GeO}_2$ 의 사용이 좋을 것으로 판단된다.

Table 2-87. 게르마늄 종류에 따른 엽면처리시 쌀 부위별 게르마늄 함량

Treatment	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
$\text{GeO}_2$	2.02	9.08	8.96	57.8	1.73	1.59
Ge-132	1.71	7.69	7.59	24.3	1.33	0.98
Ge standard solution	1.73	7.77	7.67	27.2	1.57	0.99
Commercial Ge	1.65	7.44	7.34	25.7	1.89	1.17

품종 : 호평벼, 토성 : 미사질양토, 처리농도 : 20 mg kg<sup>-1</sup>.

## 5. 재배관리

### 가. 게르마늄 처리방법

게르마늄 처리방법에 따른 쌀의 생산량은 Table 2-88에서 보는 바와 같이 전반적으로 토양 처리가 가장 많았으며 토양·엽면 동시처리와 엽면처리는 비슷한 경향이였다. 게르마늄 처리방법에 따른 쌀 부위별 게르마늄 함량은 엽면살포시 가장 높았으며 토양·엽면 동시처리, 토양처리의 순서로 높았다. 하지만 앞선 연구에서 밝힌 것과 같이, Ge를 엽면살포시 Ge에 의한 독성이 심하게 발현되어 쌀의 생산량이 급격히 감소하는 경향을 띄었다. 따라서 각 농가에서 게르마늄 쌀을 생산하고자 한다면, 쌀 생산량에 가장 영향이 주지 않으며 Ge 함량을 극대화 하는 토양처리 방법이 좋을 것으로 사료된다.

Table 2-88. 게르마늄 처리방법에 따른 쌀의 생산량과 게르마늄 함량

Treatment	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
Control	2.6±0.1	11.7±0.4	11.5±0.4	3.2± 2.0	0.8±0.2	0.5±0.3
Soil application	2.1±0.1	9.7±0.4	9.5±0.4	457.2±29.8	14.5±1.4	8.3±1.2
Foliar spray	1.4±0.2	6.3±1.1	6.2±1.1	548.2±28.1	14.5±1.2	11.6±2.1
Soil application + Foliar spray	1.4±0.1	6.5±0.3	6.4±0.3	351.1±11.6	22.6±2.2	9.8±0.6

Ge : GeO<sub>2</sub>, 품종 : 호평벼, 토성 : 미사질양토, 처리농도 : 8 mg kg<sup>-1</sup>,

Data represent mean ± SD (n = 6).

### 나. 게르마늄 처리횟수

게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 쌀 생산량 및 쌀 부위별 게르마늄 함량은 Table 2-89에서 보는 바와 같다. 게르마늄 종류에 따른 토양처리 횟수별 쌀 생산량은 다소 차이는 있으나 전반적으로 현미 > 백미 > 쌀겨 순이었다. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수에 따른 쌀겨 중 게르마늄 함량은 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 1회, 2회 및 3회가 각각 567, 576 및 687 mg kg<sup>-1</sup>로 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 증가하는 경향이였고, Ge-132 처리구의 경우 1회, 2회 및 3회가 각각 119, 106 및 89 mg kg<sup>-1</sup>로 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 감소하는 경향이였다. 게르마늄 토양처리 횟수에 따른 현미 중 게르마늄 함량은 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 1회, 2회 및 3회가 각각 36, 48 및 59 mg kg<sup>-1</sup>로 토양처리 횟수가 증가됨에 따라 점점 증가하는 경향이였고, Ge-132 처리구의 경우 모든 처리가 4.5-5.6 mg kg<sup>-1</sup>로 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없었다. 게르마늄 토양처리 횟수에 따른 백미 중 게르마늄 함량은 GeO<sub>2</sub> 처리구의 경우 전반적으로 토양처리 횟수에 따라 별 차이 없었고, Ge-132 처리구의 경우도 비슷하였다. 또한 현미 중의 게르마늄 함량이 전반적으로 백미보다 높은 경향이였다.

따라서 게르마늄함유 기능성 쌀 생산을 위해서는 벼 이앙 전 토양에 게르마늄을 처리하는 것이 가장 바람직할 것으로 판단된다.

Table 2-89. 게르마늄 종류 및 토양처리 횟수별 쌀의 생산량과 게르마늄 함량

Treatment	Time	Yield (g pot <sup>-1</sup> )			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
		Rice bran	Brown rice	Polished rice	Rice bran	Brown rice	Polished rice
Control		2.6±0.1	11.7±0.4	11.5±0.4	3.2± 2.0	0.8± 0.2	0.5± 0.3
GeO <sub>2</sub>	1	0.5±0.1	2.1±0.5	2.0±0.5	567.3±26.1	36.2± 9.6	17.9± 7.3
	2	0.3±0.1	1.2±0.5	1.1±0.5	576.9±11.4	48.4±12.4	13.0±10.0
	3	0.9±0.1	4.2±0.4	4.1±0.3	687.0±60.3	59.3±18.2	16.0±12.1
Ge-132	1	1.4±0.4	6.5±1.6	6.4±1.6	119.6± 4.6	5.6± 0.2	2.4± 0.2
	2	0.8±0.9	3.6±4.1	3.6±4.0	106.6± 5.2	5.4± 0.3	2.7± 0.2
	3	0.7±0.3	3.0±1.2	3.0±1.2	89.5± 2.0	4.5± 0.8	2.2± 1.2

1: 최고분얼기, 2: 최고분얼기+수잉기, 3: 최고분얼기+수잉기+출수기,

품종 : 호평벼, 토성 : 미사질양토, 처리농도 : 8 mg kg<sup>-1</sup>,

Data represent mean ± SD (n = 6).

#### 다. 물관리

물관리는 벼 재배에서 매우 중요한 요소이나, 게르마늄함유 쌀 생산을 위한 재배 매뉴얼에서 특별히 관리할 필요는 없다. 따라서 관행적인 벼재배 물관리 방법에 준해 물관리를 하면되고, 일반적인 물관리 방법은 아래에서 보는 바와 같다.

##### (1) 활착기의 물관리

벼는 이앙 후 새 뿌리가 나와 신장하기까지는 수분흡수량이 적을 수밖에 없다. 그러나 지상부인 잎과 줄기에서의 증산량은 많다. 이와 같은 상태가 계속되면 벼는 위조할 수 밖에 없다. 그러므로 이앙 후 하루라도 빨리 활착하여 자립하도록 하기 위해서는 잎과 줄기로부터의 수분증산을 적게 하는 일, 즉 대기에 직접 노출되는 엽신의 면적이 적도록 이앙 후 4-7일간은 6-10 cm 정도로 깊게 물을 대어주고, 새 뿌리가 발생하고 새잎이 출현하게 되면 곧 물을 얇게 대는 일이 중요하다. 또한 활착전 뿌리 뻗음이 불충분한 시기에는 바람에 의해 모가 동요되어 쓰러지기 쉬운데, 물을 깊이 대면 경엽의 동요가 적어진다. 이것이 이앙 후 식상을 방지하고 활착을 촉진시키는 물관리 요령이다.

##### (2) 분얼기의 물관리

활착이 끝난 뒤의 물관리는 물에 의한 보온이라고 하는 필요성을 제외하면 물을 깊게 담수

할 아무런 이유가 없다. 물이 깊으면 식물체는 도장하고 분얼은 억제된다. 활착 후에는 분얼이 빨리 나오면 나올수록 충실한 유효경이 되기 때문에 활착 후 3-4일은 물깊이를 2-3 cm 정도로 해서 태양광이 초엽의 하부에 적도록 배려하고, 그 후부터는 1-2 cm로 더욱 얇게 대어 유효분얼종지기까지는 물을 떼지 않도록 한다.

일반으로 관수방법은 분얼초기가 되면서 야간의 온도도 높아지면 3일에 1회 정도로 관수하되 얇게 대어 산소가 충분히 뿌리에 공급되도록 해서 토양의 급속한 환원이 이루어지지 않도록 한다.

기계이양인 치묘의 경우에는 초장이 짧고 저온기에 조식하게 되므로 햇볕이 있는 오전과 오후 5시경까지는 얇게 대고 해가 질 무렵부터 다음날 아침에 걸쳐 깊게 대어 수·지온을 보온유지해 주는 일은 매우 중요하다.

### (3) 무효분얼기와 중간낙수

게르마늄함유 벼를 항상 침수상태에 두면 토양은 환원상태로 되어 유화수소 ( $H_2S$ )와 그 밖의 유해 가스가 발생하여  $K_2O$ ,  $P_2O_5$ ,  $SiO_2$ ,  $MnO$  등 무기양분의 흡수를 저해하고 추락현상을 촉진시킨다. 그러나 무기성분 중 질소와 같은 것은 이 같은 환원상태 하에서도 비교적 흡수가 저해되지 않으므로 항상 침수상태에 있는 벼는 연약하게 도장하는 생육형태를 나타낸다. 따라서 벼 생육기간 중 적당한 시기에 낙수하여 뿌리의 건전화를 꾀하고, 양분의 균형 있는 흡수가 이루어지게 할 필요가 있다. 그런데 벼의 일생 중에서 가장 물을 필요로 하지 않는 시기는 최고 분얼기를 중심으로 한 무효분얼기이기 때문에, 이 시기에 물을 빼어 뿌리의 건전화를 도모하는 것이 무엇보다 중요하다. 이 시기에 낙수를 하는 것을 중간물떼기 (중간낙수 : midseason drainage)라고 한다.

중간낙수의 적기는 출수 40일 전부터 30일 전 사이에 약 7-10일간 실시한다. 중간낙수의 정도는 논바닥에 발자국이 날 정도가 적당하며 가볍게 실금이틀 정도에서 끝내도록 한다. 다만 배수가 나쁘고 지하수위가 높은 논에서는 보다 강하게 하지 않으면 효과가 나타나지 않는다. 중간낙수의 실시에서 얻어지는 효과는 다음과 같다.

- ① 토양의 환원으로 생긴 유화수소와 젖산, 락산 등의 유기산인 유해 물질은 낙수에 의해 배제하여 뿌리썩음을 방지하고 뿌리의 활력을 높여준다.
- ② 배수에 의해 논흙 속으로 산소 ( $O_2$ )를 공급하게 되므로 뿌리의 활력을 높이게 된다. 뿌리의 활력 증대는 양분의 흡수력을 증대하게 되는데, 이 같은 뿌리의 활력 증대는 중간낙수 후에도 오랜기간 지속시킴으로서 생육 후기까지 뿌리의 노화를 방지하는데 효과가 있다.

※ 여기서 주의해야 할 것은 중간낙수 후에 갑자기 물을 대어 주게 되면 중간낙수 기간 중 호기성 미생물의 의한 산소소비가 급증해져서 급격한 환원이 진행된다. 또한 뿌리는 짧

은 기간이지만 발상태에서 생육했기 때문에 갑자기 담수상태가 되면 생리적인 변화를 일으켜 급속한 환원화에 따른 유해물질에 대한 저항력을 잃고 썩게 된다.

- ③ 중간낙수는 질소의 흡수를 억제하여 무효분열의 발생을 억제하는 효과가 있으며, 벼를 강건하게 하여 도복에 대한 저항성을 증대시킨다.
- ④ 중간낙수는 논토양을 발상태로 변화시킴으로써 토양중의 암모니아태질소를 질산태질소로 변화시킨다. 따라서 물을 대어 흘러버리게 해서 탈질을 시켜 벼의 질소 과잉 흡수를 막아야만 건전한 생육이 가능하다. 그러나 실제로는 암모니아가 질산으로 변화는 일이며칠간의 중간낙수 정도로 쉽게 이루어지는 것은 아니다. 논토양의 조건의 따라서는 중간낙수 후에 질소효과가 나타나서 질소의 추비를 시용한 것과 같은 효과가 나타나는 경우도 있다.
- ⑤ 중간낙수는 논 바닥흙(작토)을 굳게 하여 벼포기 밑을 단단히 죄여서 도복에 대한 저항력을 증대하며, 수확작업에 알맞은 조건이 된다. 이상과 같이 중간낙수의 효과는 여러 가지 있으나, 지력이 낮고 누수가 심한 논에서는 중간낙수는 오히려 토양 중의 질소의 감소를 가져와서 감수의 원인이 된다.

한편 우리나라에서는 중간낙수의 적기가 장마철에 해당되기 때문에 좀처럼 정상적인 중간낙수가 이루어지지 못하여 그 효과도 기대하기 어렵다. 그러나 우기일수록 철저한 배수를 해서 토양환원의 방지와 토양중 산소의 공급으로 뿌리의 기능을 높여야 한다.

이상을 종합하여 보면 중간낙수의 참 효과는 뿌리의 활력을 저해하는 유해물질을 산소의 공급을 통한 산화에 의한 무해물질로 변화시키거나, 배수를 통한 유해물질 배제 목적의 물관리라는 점에서 중요하다.

#### (4) 수잉기 전·후의 물관리

이 시기는 게르마늄함유 벼의 이생을 통해서 가장 많은 물을 필요로 하는 시기이다. 가장 엽면열산량이 많은 시기이며, 또한 엽면적지수도 최대를 나타내는 시기이며, 기온도 가장 높은 고온기이기 때문이다. 따라서 이 기간에는 수분이 부족하지 않도록 충분히 공급해야한다. 이 시기에 물의 흡수량이 부족하면 발육이 저해되고 영화의 퇴화가 증가한다. 감수분열기에 고령 지나 저온의 내습이 우려될 경우에는 정상적인 화분의 발육형성이 이루어지지 못하고 불임잎이 증가하는 원인이 되므로 이를 방지하기 위해서 15cm 정도의 깊은 관개를 하도록 한다.

#### (5) 출수기 전·후의 물관리

출수기 전·후에도 수잉기에 이어서 충분한 물의 공급이 필요하다. 특히 출수개화기에는 꽃물(화수: irrigation at flowering stage)이라고 해서 담수의 중요성을 강조한다.

벼가 개화 수정해서 완전미가 되는데에는 약 35일이 걸리지만, 이 등숙기간 중에는 앞에서



생성된 동화전분이나 식물체의 저장전분을 이삭으로 전류·축적시키는 쌀 생산에 중요한 생리 작용을 영위하는 시기로서, 물의 매개가 없이는 불가능하다. 그러나 이 시기가 되면 증산량이 감소하고 수면도 경엽으로 덮어 수면증발량도 적으므로 다량의 관수는 필요가 없고 얇게 대주는 것으로 충분하다. 습답으로 환원에 의한 근부가 심한 논에서는 암거배수의 효과가 현저하면 등숙기에 물걸러대기 (간단관개 : intermittent irrigation) 또는 물흘러대기 (자유관개 : continuous irrigation)에 의한 부단한 유해물질의 배제와 산소의 공급으로 뿌리의 산화력을 오래도록 높게 유지해 주며 광합성을 높이고 증숙을 향상시키는 물관리법이다.

#### (6) 물떼기

쌀알의 발육과정으로 본 물떼기 (surface drainage)의 적기는 남부 평야지의 만생종의 경우에는 출수 후 30-35일경이다. 그러나 이것은 하나의 기준일 뿐이고, 품종, 등숙상태, 재배법, 기상, 토양, 병충해의 발생상황 등을 참작하여 낙수기를 정한다.

일반적으로 배수가 나쁜 습답은 기준일보다 일찍 물떼기하고, 누수가 심한 사질답이나 건조하기 쉬운 논외의 경우는 물떼기 후 급속히 논이 마르지 않도록 물떼기 후에도 3-4일 간격으로 한번씩 약간의 물을 관수해서 논바닥이 서서히 마르도록 한다. 또한 목·이삭가지도열병이나 균핵병이 발생한 우려가 있는 논은 물떼기를 약간 늦추어 주는 것이 좋다.

물떼기가 적기보다 빠르면 1, 2차 지경의 쌀알이 충실하지 못하고 동활미, 쇠미, 사미 등이 증가하고 낙수시기가 늦어지면 청미가 증가하고 도복하기 쉽게 된다.

#### 라. 온도

온도는 벼 재배에서 매우 중요한 요소이나, 게르마늄함유 쌀 생산을 위한 재배 매뉴얼에서 특별히 관리할 필요는 없다. 따라서 관행적인 벼재배방법에 준해 관리하면 되고, 일반적인 벼 재배 생육적온 및 한계온도는 아래에서 보는 바와 같다.

게르마늄함유 벼의 생육시기별 최적, 최저 및 최고 한계온도는 Table 2-90과 같다. 벼는 온도가 부족하면 생육이 지연되고 성장량도 적어지며 임실과 등숙이 나빠져 수량이 감소한다. 즉, 수온 15℃ 이하에서는 양·수분의 흡수가 억제되고 12℃ 이하에서는 정체된다. 벼의 생육에 미치는 온도의 영향은 기온과 수온인데, 이양 후부터 유수형성기까지는 주로 수온의 영향을 크게 받고, 유수형성기부터 수잉기까지는 수온과 기온 양자의 영향을 거의 같은 정도로 받으며, 수잉기 이후에는 주로 기온의 영향을 크게 받게 된다.

Table 2-90. 벼의 주요 생육시기별 최적 및 최저·최고한계온도

(이종훈, 1996)

생육시기		주요 온도 (°C)		
		최적	최저	최고
발아		30-32	10	45
육묘	출아	30-32	12-13	35
	녹화	25-30	10	35
	경화	20-25	10	35
활착기		25-28	12-13	35
분얼기		25-30	10-15	33
감수분열기		30-32	17-19	38
개화		30-35	15	50
수정		30-33	17-20	35
등숙기 (40일간 평균)		21-22	10-12	30

또한 주야간의 기온교차도 벼의 생육과 수량에 큰 영향을 준다. 벼의 광합성은 28°C에서 최고로 활발하며, 25-35°C 사이에서는 큰 차이가 없는데 비하여 호흡작용은 매 10°C상승 때 마다 2배로 증가 되므로 건물생산량은 낮의 온도가 높고, 밤의 온도가 낮을 때 많아진다. 대체로 정상생육 온도 범위 내에서는 주야간의 기온 교차가 클수록 건물생산에 유리하며, 특히 분얼기 및 등숙기에는 온도교차가 커야 분얼과 등숙이 촉진된다.

#### 마. 광 관리

온도는 벼 재배에서 매우 중요한 요소이나, 게르마늄함유 쌀 생산을 위한 재배 매뉴얼에서 특별히 관리할 필요는 없다. 따라서 관행적인 벼재배 방법에 준해 관리하면 된다.

벼는 단일성작물로서 일장이 짧은 단일조건에 의하여 유수가 형성되고 출수·개화한다. 그러나 단일조건에 의하여 출수가 촉진되는 효과는 품종에 따라 크게 다르다. 벼는 생육기간 중 일조가 많은 것이 생육이 건전하고 건물생산량도 커지며 등숙도 좋아진다. 즉 광합성은 광포화점에 달할 때까지 일사량이 많을수록 왕성해지는데, 벼의 광포화점은 40-50 Klux 이다. 따라서 보통재배조건 k에서의 벼의 수량은 주로 출수 후 건물생산에 의하여 지배되고 이 기간의 건물생산량은 그 기간의 일사량과 정의 상관관계를 보이며, 일사량이 많을수록 다수량을 얻는다. 벼의 영양생장기에 일조가 부족하면 분얼이 감소되고 이삭수도 적어지며 착립수도 적어진다. 또한 출수가 지연되는 이삭이 많아지고 성숙이 지연된다. 한편 유수형성기로부터 등숙기에 걸쳐 일조가 부족한 경우에는 생리작용을 감퇴시키고 쌀알의 양분집적을 억제하며 등숙을 지연시키고 등숙정지미가 많이 발생한다. 따라서 등숙율·천립중 및 수량을 크게 감소시키고 조고비율도 저하된다. 수량에 가장 크게 영향을 미치는 시기는 감수분열기로부터 출수 후 20일까지이고 결실

기의 일조부족은 특히 유백미와 사미가 많아져 미질도 나빠진다.

## 6. 게르마늄 독성관리

### 가. 벼의 게르마늄 독성

생육저해 이외에 게르마늄의 독성 (phytotoxicity)은 Photo. 2-12에서 보는 바와 같이 처리농도가 증가 할수록 엽에 갈색 반점이 많이 나타났다. 특히, 게르마늄을  $12 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 처리하였을 때는 Photo. 2-13에서 보는 바와 같이 엽에 갈색 반점이 많이 나타났고, 일부 이삭이 검게 변하였다.

게르마늄에서 독성관리를 위해 규소의 사용을 병행하는 것이 효과적인 것으로 보고되고 있다. 특히 벼의 경우 호규산성 작물이며, Si는 Ge과 같은 4A족에 속하며 화학적 성질이 비슷하여 함께 연구되었다. 벼에서 Ge 연구는 과거에 Si의 이동을 연구할 목적으로 사용되었으며, 게르마늄 처리시 식물은 독성을 일으키는데 벼의 경우 생육이 억제되고 황화현상을 일으킨다고 하였다. Ge-Si와 Ge-C 결합은 Si-Si와 Si-C 결합보다 약하기 때문에 세포벽의 정상적인 기능을 손상시키는데 황백화는 이러한 이유에 의해 일어난다고 하였으며, 황백화가 일어나는 식물체 부위에 Ge의 축적이 많았다는 것과 일치한다고 하였다. 게르마늄은 식물체에서 음전하와 결합하는데 세포벽의 acidic residue는 Ge의 binding site로 작용하기도 한다. 식물에서 Ge은 독성이 있는데 벼의 경우 생육이 억제되고 황화현상을 일으킨다고 하였다.

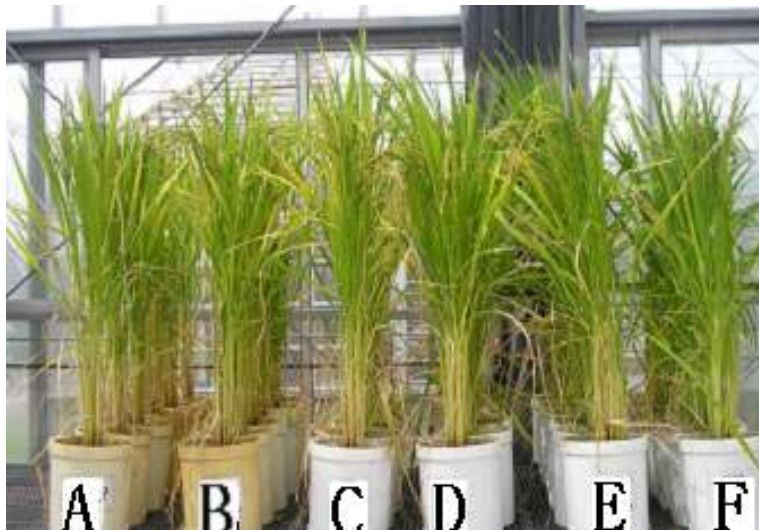


Photo. 2-12. 게르마늄 토양처리 농도에 따른 벼의 생육시기별 생육상황.

A : Ge  $0 \text{ mg kg}^{-1}$ , B : Ge  $1 \text{ mg kg}^{-1}$ , C : Ge  $2 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  
D : Ge  $4 \text{ mg kg}^{-1}$ , E : Ge  $8 \text{ mg kg}^{-1}$ , F : Ge  $12 \text{ mg kg}^{-1}$ .



Photo. 2-13. 토양에 Ge 12 mg kg<sup>-1</sup> 처리시 벼 잎, 줄기 및 낱알에 나타난 게르마늄 독성.

수확 후 게르마늄의 생육특성은 Table 2-91에서 보는 바와 같이 게르마늄 토양 처리농도가 증가할수록 게르마늄 독성 (phytotoxicity)이 증가하였으며, 독성의 증가로 초장, 수장, 수수 및 천립중이 떨어져 수량이 감소되었다. 게르마늄 8 mg kg<sup>-1</sup> 이상에서 부터 게르마늄 독성이 나타나므로 벼의 정상적인 생육을 위해서는 그 이하의 농도로 게르마늄을 처리하여야 할 것으로 생각된다. 게르마늄 12 mg kg<sup>-1</sup> 처리시 수량은 무처리에 비해 크게 감소하였다.

본 연구자의 선행연구에서 일미벼에서 Ge 2.5 mg kg<sup>-1</sup> 이상에서부터 게르마늄 독성이 나타나기 시작하고, Ge 7.5 mg kg<sup>-1</sup> 처리시 심한 생육저해를 보였으나, 동진벼를 사용한 본 연구에서는 Ge 8 mg kg<sup>-1</sup>까지는 초장의 경우 무처리구와 별 차이가 없었으며, Ge 12 mg kg<sup>-1</sup>부터 게르마늄 독성이 나타나기 시작하였다. 따라서 벼의 품종에 따라 게르마늄의 독성발생범위가 차이가 나는 것으로 판단할 수 있었다.

Table 2-91. 게르마늄 토양 처리농도에 따른 벼의 생육특성

Treatment (mg kg <sup>-1</sup> )	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	No. panicle per hill	No. grain per panicle	1,000 grain (g)	Yield (g pot <sup>-1</sup> )	T/R ratio
Ge 0	60.8±1.4	18.9±1.9	8.8±1.1	97	22.8	15.7	7.57
Ge 1	64.0±2.9	19.6±1.6	8.3±0.9	99	22.9	10.3	4.32
Ge 2	63.9±6.3	19.8±1.1	8.8±0.7	111	23.6	17.1	6.42
Ge 4	65.1±4.6	21.2±1.8	9.3±0.8	106	22.6	14.7	6.75
Ge 8	64.3±4.2	21.1±0.8	8.5±1.0	108	22.4	12.8	4.94
Ge 12	61.3±4.4	19.8±1.3	7.7±0.9	89	22.1	10.1	4.07

### 나. 규소와 게르마늄의 관계

유기게르마늄의 효과적인 농축수단으로 식물체가 이용되기도 하였는데, 그 때에 원소주기율 표에서 같은 4A족에 속하며 Ge와 화학적 성질이 비슷한 Si가 함께 연구되었다. Si-H 결합과 Ge-H 결합은 강도는 비슷하고 (Glockling, 1969), Si와 Ge은 원자반경도 비슷하다 (Kada 등, 1984). Si와 Ge은 크기도 비슷하기 때문에 생물학적 시스템에서 Si 대신에 Ge가 치환될 가능성이 있다고 하였다 (Davydov, 1966). Werner (1996)는 황백화의 원인으로 Ge이 Si의 흡수를 저해하기 때문으로 보고하였다. Ge-Si와 Ge-C 결합은 Si-Si와 Si-C 결합보다 약하기 때문에 세포벽의 정상적인 기능을 손상시키며, 황백화가 일어나는 부위에서 Ge의 축적이 많았다는 것과 일치한다고 하였다 (Matsumoto 등, 1975). Datnoff (2001)등은 Si와 Ge은 식물체 흡수에 유사성이 있다고 보고하였으며 Table 2-92에서 보면 규소함량이 많은 작물이 게르마늄 함량도 높았다. 벼는 뿌리를 제거함으로 게르마늄 함량이 현저히 줄었지만 나팔꽃은 오히려 뿌리제거로 함량이 높았다. 이로써 식물의 게르마늄 흡수는 3가지 방식이 있는데 active한 벼와 passive한 완두콩, rejective한 나팔꽃이 있다. 이는 식물체 뿌리가 게르마늄과 규소를 구분하지 못한다고 생각할 수 있고, 규소의 흡수 치환으로 게르마늄이 사용될 수도 있다는 것이다. 하지만 게르마늄 흡수는 식물체 앞에 갈색반점의 독성을 일으킨다.

Table 2-92. Si ( $H_4SiO_4$ )  $50\text{ mg L}^{-1}$ 과 Ge ( $H_4GeO_4$ )  $5\text{ mg L}^{-1}$ 을 함유한 양액재배 작물에서의 Si 및 Ge 함량 (Datnoff 등, 2001)

Plant species	Si(%) <sup>a</sup>	Ge(mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>
Rice	6.61	3,140
Wheat	3.81	1,720
Maize	2.23	105
Kidney bean	1.24	860
Tomato	0.11	140
Morning glory	0.11	105

※ The plants were treated for 3 to 4 weeks,

<sup>a</sup>Dry weight basis.

### 다. 규산질비료

#### (1) 규산질비료 시용효과

규산은 벼가 필요로 하는 양분 중에서 가장 많이 흡수하는 중요한 양분이다. 심지어는 질소에 비해 8배나 많은 양을 필요로 한다고 알려져 있다. 벼가 규산을 많이 흡수하게 되면 잎과 줄기가 단단해져 잘 쓰러지지 않고 뻗뻗이 서 있으므로 햇볕을 많이 받아 생육이 왕성하고 등숙이 좋아져 안전한 수량을 얻게 된다. 또한 표피로 규산이 이동하여 표피가 튼튼해지기 때문에 외부로부터 병균의 침입을 막는 역할을 하여 병에 대한 저항성을 갖게 된다.

특히 Table 2-93에서 보는바와 같이 목도열병 상습지, 산간고냉지, 냉조풍지대에서 규산질비료의 시용효과는 매우 크다. 규산질비료의 시용은 밀거름으로 150-200 kg 10a<sup>-1</sup>을 4년 1주기로 사용하는 것이 효과적이며, 경운전에 살포하여 반드시 전층시비가 되도록 해야한다.

Table 2-93. 규산질비료 시용에 따른 증수효과

규산질비료 무시용 논	규산질비료 시용 논		
	목도열병상습지	산간고냉지	냉조풍지
100	151	120	110

이렇듯 벼에 있어서 규산이 중요함에도 불구하고 우리나라 논토양 중에는 유효규산 함량이 낮아 규산을 시용하여야 할 면적이 많은 것이 사실이다. 우리나라 논토양의 유효규산 함량은 평균 72 mg kg<sup>-1</sup> 정도로서 적정함량인 130-180 mg kg<sup>-1</sup>보다 크게 낮으며, 우리나라 논면적의 약 92%가 유효규산 함량이 부족한 것으로 조사된바있어 대부분의 우리나라 논은 규산의 시용 효과를 얻을 수 있다.

규산을 시용하면 벼가 규산을 흡수하여 잎과 줄기가 뻗뻗하게 되어 수광상태가 좋아지며 흡수된 질소성분을 최대한 활용하게 된다. 규산질 비료는 가용성 규산과 석회, 고토가 함유되어 있어 양이온의 공급과 함께 토양산도를 교정하여 인산의 흡수 이용률을 증대시키는 효과가 있다.

## (2) 규산질비료의 종류

### (가) 규회석비료

규회석 비료는 천연암석인 규회석을 분쇄 분말화한 것으로 가용성 규산함량이 8-15% 정도이며 알카리분이 35-45% 정도로 규산 시용효과는 물론 석회시용 효과도 동시에 얻을 수 있다. 그러나 규회석 비료는 생산가격이 높아 생산량이 매우 적은 실정이다.

### (나) 규산질비료

규산질비료는 제철과정에서 부생되는 것으로서 철광석을 용광로에 넣어 녹이고 물리적인 방법으로 철을 분리한 후 남은 잔류물을 서서히 냉각시켜 분말화한 것을 말한다. 규산질비료는 가용성 규산함량이 25-35% 정도, 알카리분이 40-45% 정도이며 구용성 고토도 소량 함유되어 있다. 국내에서 유통되는 규산질비료는 대부분 제철부산물로 제조한 것이다.

## 제 3 절 게르마늄함유 기능성 채소 수경재배기술 개발

### I. 게르마늄과 셀레늄이 채소종자발아 및 유묘생장에 미치는 영향

#### 1. 연구내용 및 방법

##### 가. 공시채소종자

공시채소종자는 (주)홍농종묘의 적측면 상추 (Lettuce: *Lactuca sativa* L), 찐겔사이 청경채 (Pak-choi: *Brassica campestris* L. ssp), 아카오바타카나 갓 (Leaf mustard: *Brassica rapa* var. *glabra* Regel), 강력여름 배추 (Chinese cabbage: *Brassica juncea* var. *integrifolia*)를 사용하였다.

##### 나. 게르마늄 및 셀레늄

실험에 사용한 게르마늄은 유기게르마늄 [Ge-132, carboxyethyl germanium sesquioxide  $3(\text{GeCH}_2\text{COOH})_2$ , (Sigma Chemical Co., St. Louis, USA)]과 무기게르마늄 [ $\text{GeO}_2$ , (Sigma Chemical Co., St. Louis, USA)] 2종류를 각각 농도별 (0, 10, 25, 50 및  $100 \text{ mg L}^{-1}$ )로 조제하여 사용하였으며, 셀레늄은 무기셀레늄 [ $\text{SeO}$ , Sigma]을 사용하였다.

##### 다. 종자 발아 및 식물 성장 조사

게르마늄과 셀레늄이 채소 종자 발아 및 유묘생장에 미치는 영향을 조사하기 위하여 외간상 상처가 없는 채소종자 (갓, 배추, 청경채 및 상추)를 선별 사용하여 발아시험을 하였다. 발아시험은 petri-dish ( $90 \times 15 \text{ mm}$ )에 흡습지 (ADVANTEC No. 2,  $90 \text{ mm}$ ) 1매를 깔고 무기 및 유기 게르마늄과 셀레늄을 증류수에 희석한 농도별 (0, 10, 25, 50 및  $100 \text{ mg L}^{-1}$ )로 각각 5 mL 씩 주입한 다음 각 채소종자를 40립 씩 치상한 후  $4^\circ\text{C}$ 에서 3일간 저온 처리 한 후 실온 ( $22-24^\circ\text{C}$ )에서 발아시켰다. 수분 유지를 위하여 게르마늄 농도별 용액 3 mL을 매 이틀 마다 보충하였다. 발아율은 실온에 방치 후 1일째와 3일째 각각 조사하였다. 발아는 유근이 종피를 뚫고 1 mm 이상 신장한 것을 기준으로 육안으로 조사하였다. 식물의 유묘생장조사는 발아시킨 4일 째에 40개 식물의 줄기와 뿌리의 길이를 각각 측정하여 비교하였으며, 모든 실험은 3 반복하여 평균값을 나타내었다.

##### 라. 게르마늄 흡수량 분석

식물체내 게르마늄분석 및 셀레늄 분석은 [제1절]에서 구명된 시료전처리 및 분석방법에 따라 수행하였다. 발아 6일 후에 표본식물을 채취하여 증류수에 3회 세척한 후  $70^\circ\text{C}$  dry oven에서 36 시간 건조 시킨 후 시료 0.5 g에  $\text{HNO}_3$  5 mL을 가하여  $45^\circ\text{C}$  over night 시킨 다음,  $95^\circ\text{C}$ 에서 5 시간 분해하였다. 분해 액을 최종으로 10 mL로 정용한 후 No. 6 여과지로 여과하여 ICP-AES (Inductively coupled plasma atomic emission spectrometer, Optima 3300DV,

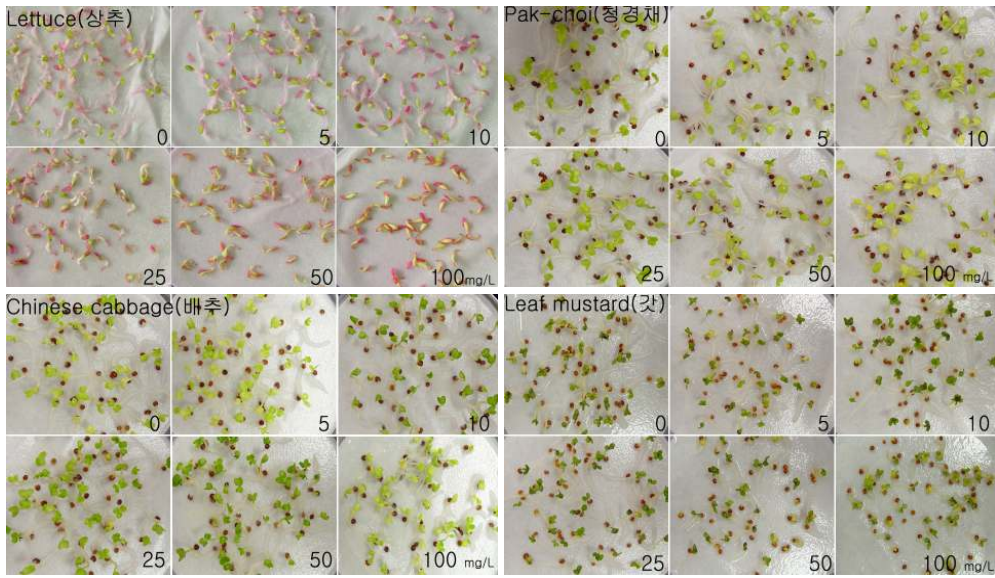
Perkin-Elmer, USA)로 분석 하였다.

## 2. 게르마늄이 채소종자발아 및 유묘 생장에 미치는 영향

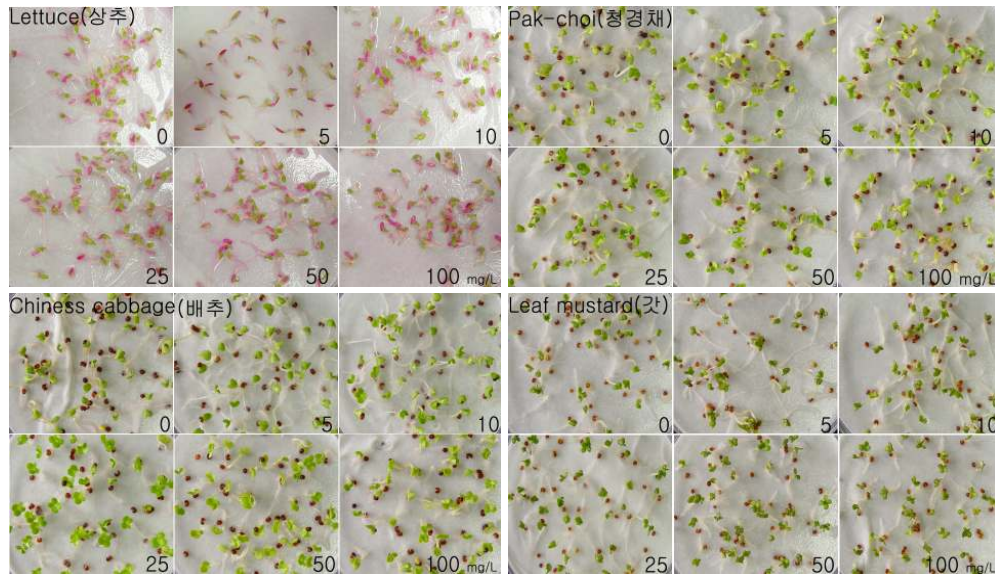
### 가. 채소종자 발아에 미치는 영향

게르마늄 농도별 갓 (leaf mustard), 배추 (chinese cabbage) 및 청경채 (pak-choi)의 종자발아에 미치는 영향을 조사한 결과는 Fig. 3-1 및 Table 3-1에서 보는바와 같다. 무기게르마늄의 경우 초기 발아 (1 day) 시에는  $50 \text{ mg L}^{-1}$ 까지는 큰 차이를 보이지 않는 반면  $100 \text{ mg L}^{-1}$  처리시 갓, 배추 및 청경채에서 각각 3.2%, 11.4% 및 10%의 저해현상을 보였으나 발아 3일째에는 모든 조건에서 대조구와 비교 시 큰 차이를 보이지 않았다. 이와 달리 유기게르마늄의 경우에는 모든 처리 조건에서 대조구와 거의 같은 발아율을 보였다. 따라서 아주 높은 농도 (예, 무기게르마늄  $100 \text{ mg L}^{-1}$ )를 제외하고는 게르마늄의 종류 및 처리 농도에 따른 갓, 배추 및 청경채 발아율은 크게 영향을 받지 않는 것으로 확인이 되었다.





[무기게르마늄 (GeO<sub>2</sub>)]



[유기게르마늄(G-132)]

Fig. 3-1. 게르마늄 농도에 따른 발아 3일 후 채소종자별 발아상태

Table 3-1. 게르마늄 농도에 따른 채소종자별 발아율

Types of Germanium	Concentration (mg L <sup>-1</sup> )	Germination rate (%)						
		Leaf mustard		Chinese cabbage		Pak-choi		
		1 day	3 day	1 day	3 day	1 day	3 day	
Control	0	97.1	98.8	97.5	96.3	91.6	100.0	
	5	98.0	98.7	96.3	100.0	90.7	100.0	
	10	96.7	98.6	97.1	98.0	92.0	100.0	
	GeO <sub>2</sub>	25	97.1	97.0	96.7	99.3	91.6	100.0
		50	97.1	98.7	96.3	99.7	91.6	100.0
		100	94.0	99.1	86.4	99.3	82.6	100.0
Ge-132	5	95.8	98.8	97.1	100.0	92.0	100.0	
	10	94.9	99.6	96.9	100.0	92.3	100.0	
	25	97.1	98.8	97.8	100.0	91.8	100.0	
	50	99.6	99.2	97.3	100.0	91.5	100.0	
	100	99.2	98.8	97.7	100.0	92.4	100.0	

나. 유묘 생장에 미치는 영향

게르마늄 농도에 따른 갓, 배추 및 청경채의 유묘생장특성을 비교하기 위하여 유기 및 무기 게르마늄 각각을 0, 10, 25, 50 및 100 mg L<sup>-1</sup> 농도별로 처리 한 후 4일째의 식물생장을 지상부 (shoot)와 지하부 뿌리 (root)의 길이를 측정하여 비교 조사하였다 (Fig. 3-2, Fig. 3-3).

게르마늄 종류에 따른 생육정도는 상추, 청경채, 배추 및 갓 모두 유기게르마늄에 비해 무기 게르마늄에서 생육저해를 크게 받는 것으로 나타났다. 게르마늄 농도에 따른 생육정도는 유기 및 무기게르마늄 모두 농도가 높아질수록 저해를 받았으며 그 저해정도는 채소종자 종류에 따라 약간씩 차이가 있었다. 상추는 유기게르마늄처리에서 25 mg L<sup>-1</sup>까지는 대조군과 별 차이가 없었으나 50 mg L<sup>-1</sup> 이상에서는 생육저해 현상이 나타났으며 대조군과 비교하여 뿌리가 53%, 줄기가 19%로 감소하였으며, 무기게르마늄처리에서 상추가 다른 채소 종자에 비하여 저해를 가장 많이 받았다.

상추의 전반적인 성장반응은 유기게르마늄 (Ge-132) 처리구의 경우 10 및 25 mg L<sup>-1</sup>처리에서 지상부 및 지하부 모두 대조군과 성장차이가 없었으나 무기게르마늄 (GeO<sub>2</sub>)의 경우에 크게 저해를 받았다. 50 및 100 mg L<sup>-1</sup>처리에서는 유기 및 무기게르마늄 모두 저해를 받았으며 유기게르마늄에 비하여 무기게르마늄 처리구에서 더 크게 성장저해를 받았다.

갓의 경우 무기게르마늄 GeO<sub>2</sub>) 처리 시, 대조군 (뿌리: 2.10 cm, 지상부: 0.89 cm)에 비해 뿌리의 생장이 모든 농도에서 현저하게 저해 되었으며, 저해 정도는 대조군에 비해 무기게르마늄 10 mg L<sup>-1</sup> 처리시 약 22%, 25 mg L<sup>-1</sup> 처리시 약 37%, 50 mg L<sup>-1</sup> 처리시 52%, 그리고 100 mg L<sup>-1</sup> 처리시 62% 정도의 성장저해를 보였다. 지상부의 성장정도는 낮은 농도 10 and 25

mg L<sup>-1</sup>)에서는 약 10%의 성장증가를 보였으며, 높은 농도에서는 10% 정도 저해를 보였지만 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 반면 유기게르마늄 (Ge-132)을 같은 농도 10, 25, 50 및 100 mg L<sup>-1</sup>)로 처리 하였을 때 뿌리의 생장은 25 mg L<sup>-1</sup>처리시 무기게르마늄의 결과와는 달리 오히려 대조구에 비해 10%정도 증가하는 결과를 보였고, 높은 농도 처리시에도 성장에는 크게 저해를 받지 않았다. 지상부 (shoot) 성장정도는 25 mg L<sup>-1</sup> 처리 시 까지는 대조구에 비해 약 20% 정도 증가하다가, 50 mg L<sup>-1</sup>이상 처리시에는 대조구에 비해 오히려 약 10% 정도 감소되었다.

배추의 경우에도 뿌리 및 지상부의 성장정도는 유기 및 무기게르마늄 처리 모두에서 것과 비슷한 경향을 보였다. 무기게르마늄의 경우 대조구에 비해 뿌리 생장이 10 mg L<sup>-1</sup> 처리시 약 24%, 25 mg L<sup>-1</sup> 처리시 약 40%, 50 mg L<sup>-1</sup> 처리시 약 52% 그리고 100 mg L<sup>-1</sup> 처리시에는 약 67%의 성장저해를 보였다. 지상부의 생장은 뿌리의 성장과는 달리 10 와 25 mg L<sup>-1</sup> 처리 시에는 각각 약 22% 및 11% 정도 증가되었으나 높은 처리농도인 50 및 100 mg L<sup>-1</sup>에서는 각각 약 22% 및 32% 정도 저해되는 경향을 보였다. 그리고 유기게르마늄 10, 25, 50 mg L<sup>-1</sup> 처리시 뿌리의 생장은 대조구에 비해 각각 약 25%, 32%, 28% 정도 증가하는 경향을 보였으며 높은 농도인 100 mg L<sup>-1</sup> 처리시에는 약 32% 정도 저해를 보였다. 지상부의 생장은 모든 처리구에서 저해양상을 보이지 않았으며 25 mg L<sup>-1</sup> 처리시 대조구에 비해 약 44% 정도 생육이 증가되는 경향을 보였다.

그리고 청경채의 경우는 것과 배추와는 다른 경향을 보였으며, 무기 및 유기게르마늄 처리 모두에서 현저한 성장저해를 보였다. 무기게르마늄 처리시 뿌리의 생장은 처리 농도에 따라 40-78%의 저해를 보였고 처리량이 증가 할수록 저해정도도 증가하는 경향을 보였으며, 지상부의 성장에서도 모든 조건에서 약 25%-47%의 저해를 보였다. 유기게르마늄 처리에서도 것과 배추의 경우와는 달리 모든 처리 조건에서 뿌리의 생장은 25%-45% 정도 저해를 보였고 지상부의 생육 정도도 대조구와 비교 시 12%-27% 범위에서 저해양상을 보였다.

이상의 결과로 볼 때 게르마늄의 종류에 따라 채소종자 발아와 식물 성장효과는 다르게 나타났으며, 유기게르마늄에 비해 무기게르마늄에서 식물 생육 저해 현상이 높은 것으로 확인 되었다. 유기게르마늄 처리에서는 전반적으로 무기게르마늄에 비해 식물 성장저해정도가 미미하였으며 것과 배추의 경우에는 낮은 처리 농도 (25 및 50 mg L<sup>-1</sup>)에서는 게르마늄 무처리에 비하여 오히려 뿌리 및 지상부의 생장이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 청경채의 경우는 것과 배추와는 달리 유기게르마늄의 농도가 증가할수록 성장 저해가 크게 나타났다.

최근에는 게르마늄의 농작물 처리 효과에 대한 연구결과들이 많이 보고되고 있는데, Lee 등은 낮은 농도의 게르마늄을 토양에 처리하여 벼와 상추의 생육을 조사한 연구결과에서 벼는 게르마늄 처리농도가 증가함에 따라 게르마늄 독성의 증가로 벼의 생육과 수량이 급격히 감소하는 경향을 보였으나, 상추에서는 생육에 대한 게르마늄의 독성은 거의 보이지 않았다고 보고하였다. Chang과 Oh는 무기게르마늄의 첨가가 액체 배양 중 인삼 부정근의 생장에 미치는 영향을 조사 하였을 때 10 mg L<sup>-1</sup> 까지는 생육에 영향을 미치지 않았지만 높은 농도 (100 mg

$L^{-1}$ )의 처리시에는 생장이 약 50% 정도 저해가 된다고 보고 하였다. Lee 등은 수경재배방법으로 상추 재배시 낮은 농도의 무기게르마늄 처리에서 약간의 성장 증가효과가 있었다고 보고하였다.

따라서 게르마늄의 처리에 대한 작물의 반응은 농도별, 작물의 종류별, 실험 조건 별 등의 다양한 환경조건에 따라 다양한 반응을 보이는 것으로 보고되고 있지만, 본 연구에서는 전반적으로 새싹채소의 초기생장에 있어서 유기게르마늄은 무기게르마늄에 비해 식물에 대한 독성이 덜하여 무기게르마늄 보다 식물 성장 저해의 정도가 미미한 것으로 생각되어진다.

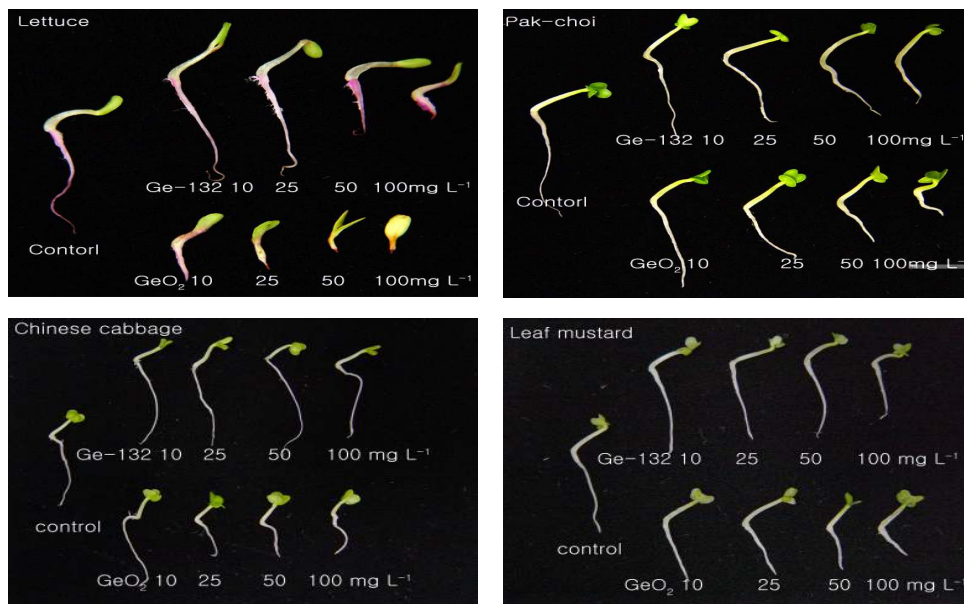
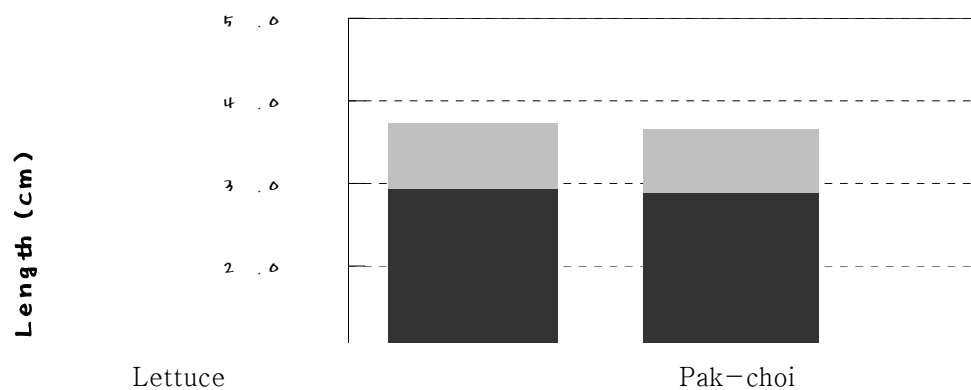


Fig. 3-2. 게르마늄 농도에 따른 발아 6일 후 채소종자별 생육상태 비교



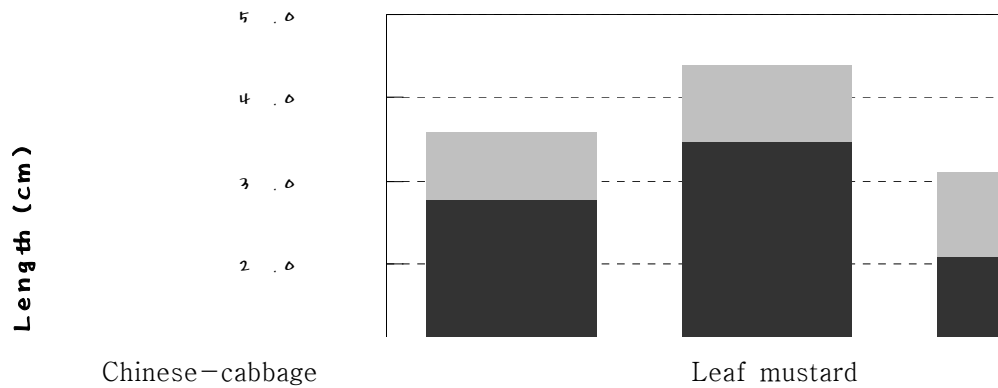


Fig. 3-3. 게르마늄 농도에 따른 발아 6일 후 채소종자별 초장 및 근장 비교 (Numbers mean average lengths of root and shoot. Error bars are presented as +/-SD from three independent experiments.)

#### 다. 게르마늄 흡수특성

식물체내 게르마늄 흡수 특성을 조사하기 위하여 무기 및 유기 게르마늄을 각각 0, 10, 25, 50 및 100 mg L<sup>-1</sup>의 농도별로 처리하여 상추, 갓, 배추 및 청경채의 어린 식물을 이용하여 게르마늄의 흡수특성을 조사하였다 (Fig. 3-4).

갓의 경우, 무기게르마늄을 각각 10-100 mg L<sup>-1</sup> 처리에서 식물체내 게르마늄 함량은 각각 0.23-0.99 mg g<sup>-1</sup>dw 범위에서 농도가 높아짐에 따라 점진적으로 증가하였다. 유기게르마늄 처리시에는 식물체내 게르마늄 함량은 0.54-4.50 mg g<sup>-1</sup>dw 범위로 무기게르마늄 처리에 비해 약 2.3-4.5배 정도 많이 축적되었다.

배추의 경우에는 동일 농도의 무기게르마늄과 유기게르마늄의 처리시 식물체내 게르마늄함량은 갓에 비하여 약간 낮은 경향을 보였으며, 무기게르마늄 처리시 약 0.18-0.83 mg g<sup>-1</sup>dw, 그리고 유기게르마늄 처리시 약 0.34-2.72 mg g<sup>-1</sup>dw 으로 전반적으로 처리 농도가 높을 수록 증가하는 경향을 보였고 무기게르마늄 처리에 비하여 약 1.89-3.28배 정도 높은 흡수특성을 보였다.

청경채의 경우에도 갓과 배추와 비슷한 경향을 보였다. 무기게르마늄 10-100 mg L<sup>-1</sup> 처리시 약 0.19-0.94 mg g<sup>-1</sup>dw 범위의 축적량을 보였고, 유기게르마늄의 처리시에는 약 0.36-2.19 mg g<sup>-1</sup>dw 범위의 게르마늄 흡수량을 보여 유기게르마늄의 처리에서 무기게르마늄 처리에 비하여 약 1.9-2.7배 정도 높은 흡수 특성을 보였다. 전반적으로 게르마늄 종류에 따른 식물체내 게르마늄 흡수특성은 유기게르마늄처리에서 무기게르마늄처리에 비하여 높았으며 식물체내 게르마늄 흡수율은 유기게르마늄처리에서 무기게르마늄 처리에 비해 약 1.89-4.5배 정도 높았다.

따라서 식물체내 게르마늄 흡수정도는 처리농도가 높을수록 전반적으로 높아지고, 무기게르마늄에 비해 유기게르마늄의 처리시 훨씬 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Lee 등이 상추에 무기게르마늄을 처리하였을 경우 농도가 증가 할수록 상추 내 흡수된 게르마늄의 함량이 증가

하였으며, Han 등이 콩나물에 유기 및 무기게르마늄을 처리하였을 경우 유기게르마늄처리 콩나물에서 무기게르마늄처리 콩나물 보다 흡수량이 높았다는 보고와 비슷한 경향을 보였다.

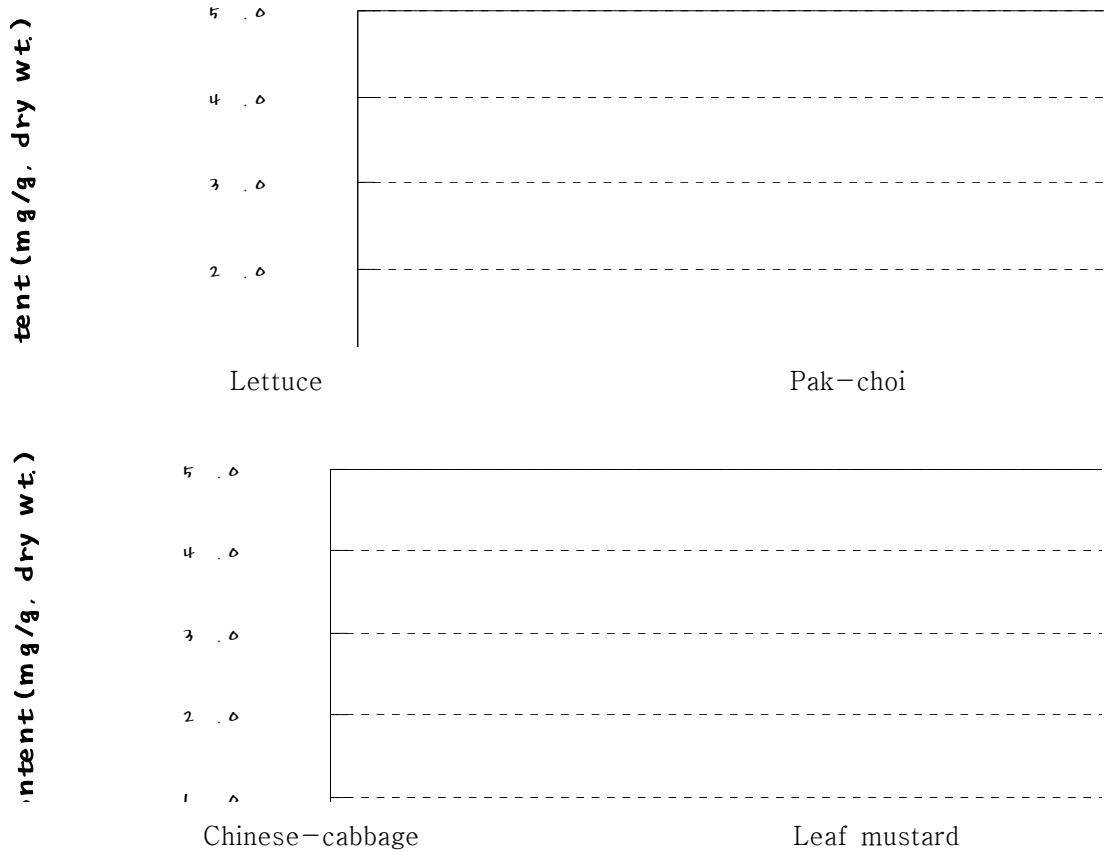


Fig. 3-4. 게르마늄 농도에 따른 발아 6일 후 채소종자식물별 게르마늄 흡수량 비교

라. 게르마늄 용액 pH에 따른 발아특성 및 생육특성

채소종자에 처리하는 게르마늄 용액의 pH가 종자발아 및 생육과 게르마늄 흡수에도 크게 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상되어 pH를 4, 5, 6, 7, 8, 9로 조절한 용액에 유기게르마늄과 무기게르마늄 농도를  $25 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 고정하여 상추와 청경채를 대상으로 발아율, 생육상태, 게르마늄 흡수량 등을 조사한 결과(Fig. 3-5), 예상과는 달리 발아율과 생육상태, 그리고 식물체 내 게르마늄 흡수량 모두 별 차이가 없는 것으로 나타났다.

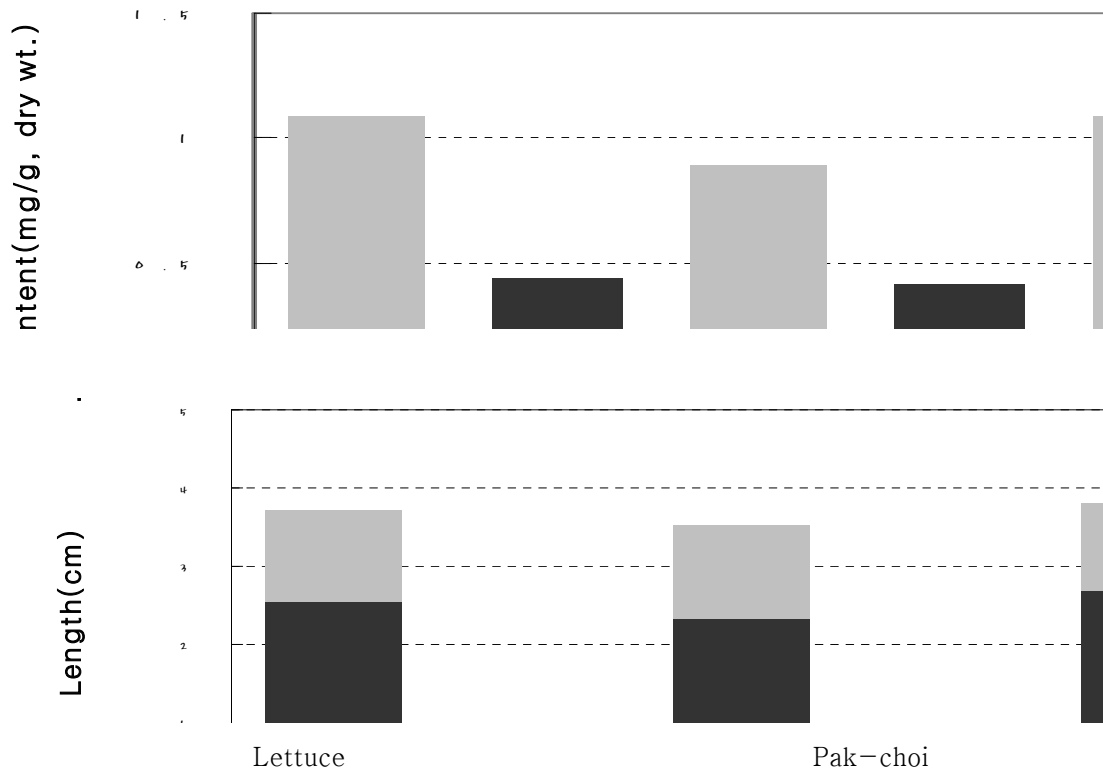


Fig. 3-5. pH에 따른 발아 4일 후 채소종자별 생육상태 및 게르마늄 흡수량 비교

### 3. 셀레늄이 채소종자발아 및 유묘 성장에 미치는 영향

#### 가. 채소종자 발아에 미치는 영향

셀레늄 농도에 따른 채소종자별 발아특성(Fig.3-6, 3-7)은 전반적으로 상추와 배추는 발아율에 저해가 없었으나, 청경채와 갓은 농도가 높아짐에 따라 초기 발아율에 저해를 받았다. 발아 1일째 상추는 셀레늄 농도  $25 \text{ mgL}^{-1}$ 까지는 100%의 발아율을 보였으나  $50 \text{ mgL}^{-1}$ 에서는 98%,  $100 \text{ mgL}^{-1}$ 에서는 92%의 발아율을 보였다. 또한 발아 1일째 배추는 셀레늄 농도  $100 \text{ mgL}^{-1}$ (92%)를 제외한 모든 처리구에서 100% 발아하였으며, 발아 3일째 상추와 배추는 모든 처리구에서 100% 발아하여 대조구와 차이를 보이지 않았다.

발아 1일째 청경채와 갓의 발아율은 셀레늄 농도가 높아짐에 따라 감소하였으며 청경채는  $50 \text{ mgL}^{-1}$ 에서 저해가 뚜렷하였다. 발아 3일째 청경채의 발아율은  $5 \text{ mgL}^{-1}$ 까지는 발아율이 100%로 대조구와 차이가 없었으나  $10 \text{ mgL}^{-1}$ 부터 약간의 저해를 확인 할 수 있었다. 갓은 초기발아에 크게 저해를 받았으나 발아 3일째 모두 대조구와 비슷한 발아율을 보였다.

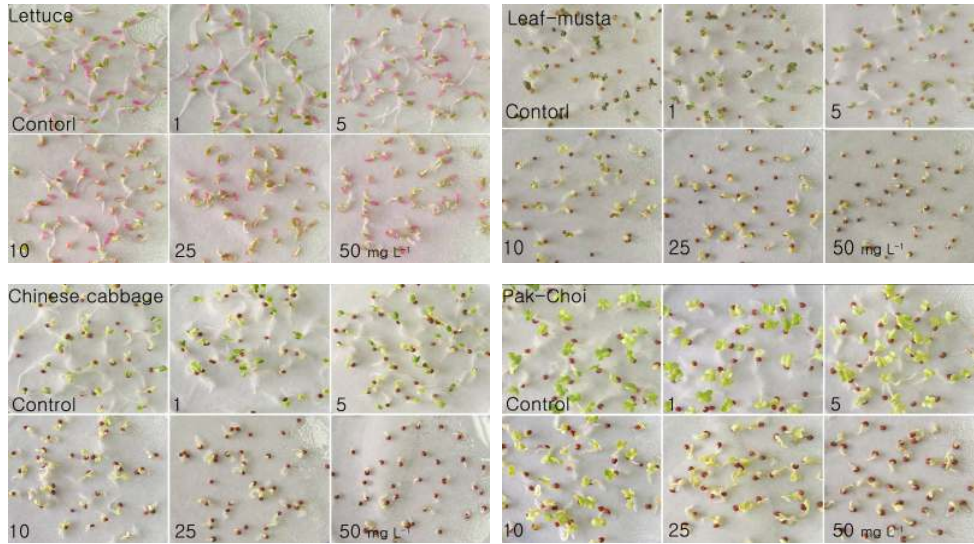


Fig. 3-6. 셀레늄 농도에 따른 발아 6일 후 채소종자별 발아상태

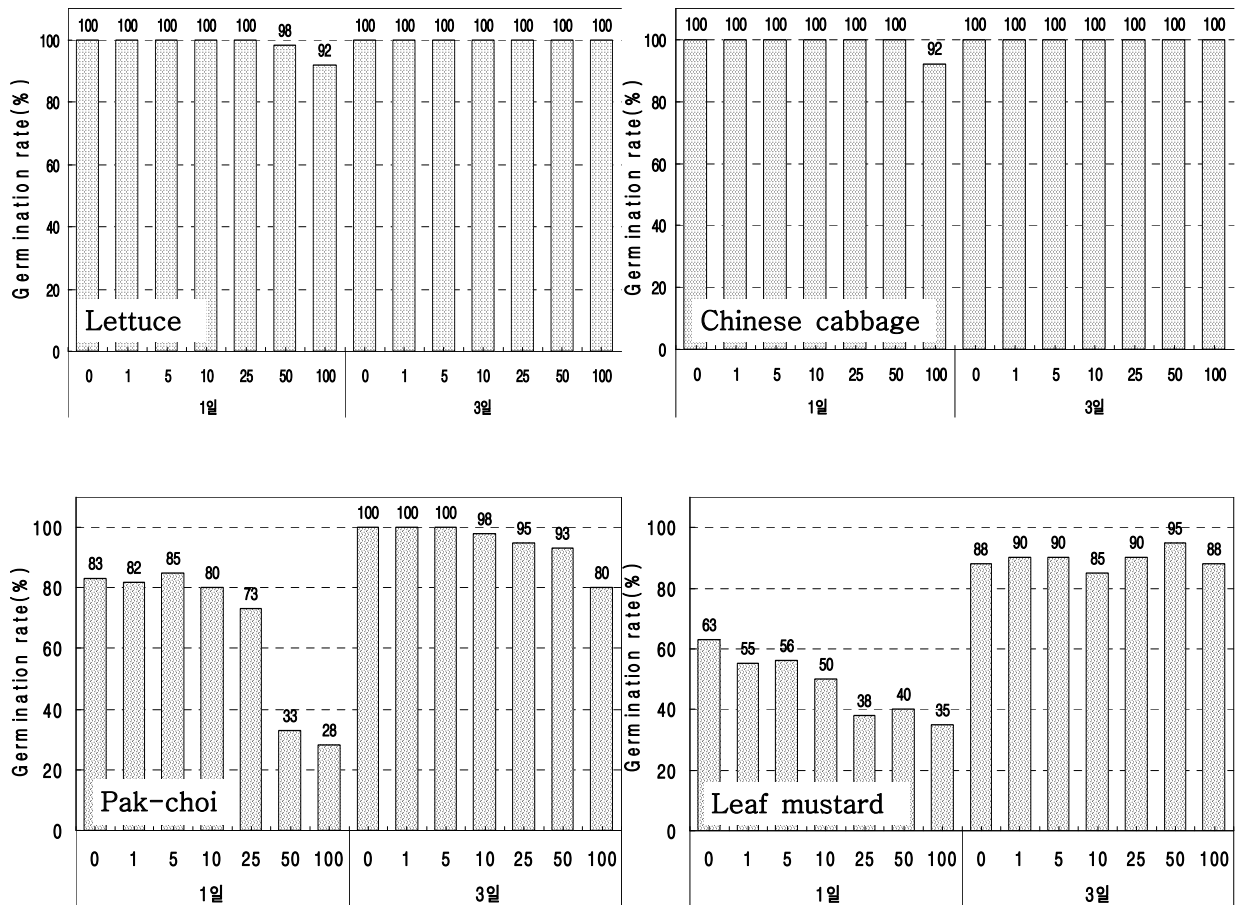


Fig. 3-7. 셀레늄 농도에 따른 채소종자별 발아율

나. 유묘 성장에 미치는 영향

셀레늄 농도에 따른 발아된 채소종자의 생육 비교를 위하여 발아 후 6일째 초장 및 근장을 측정하였다(Fig. 3-8, 3-9). 상추와 배추는 셀레늄 처리농도 5 mgL<sup>-1</sup>까지는 초기 식물생육 측



진형상을 보였으며 대조구의 길이와 비교하였을 때  $1 \text{ mgL}^{-1}$  농도에서 상추는 1.5배 배추는 1.4배 증가하였다. 그러나 셀레늄 처리농도  $10 \text{ mgL}^{-1}$ 에서부터는 생육 저해를 받기 시작하였다.

청경채와 갓은 셀레늄 처리농도  $1 \text{ mgL}^{-1}$ 에서는 대조구와 같거나 비슷하였으나,  $5 \text{ mgL}^{-1}$  이후부터는 농도가 높아짐에 따라 대조구에 비해 Root의 생육에 저해를 받았는데 이는 뿌리로부터 흡수된 셀레늄이 뿌리에 축적되어 세포분열이 지연되면서 생장이 억제되는 것이라 생각되어진다.

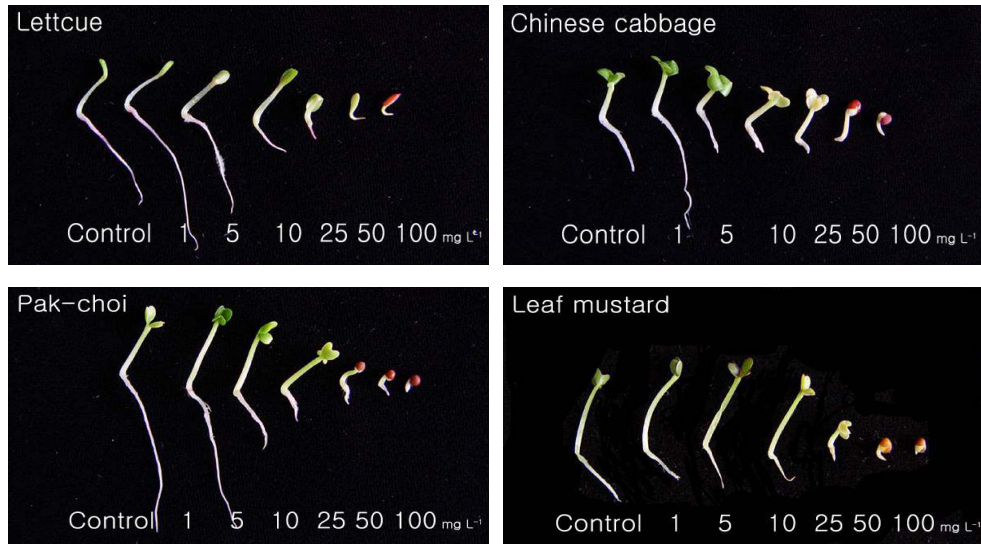


Fig. 3-8. 셀레늄 농도에 따른 발아 6일 후 채소종자별 생육상태 비교

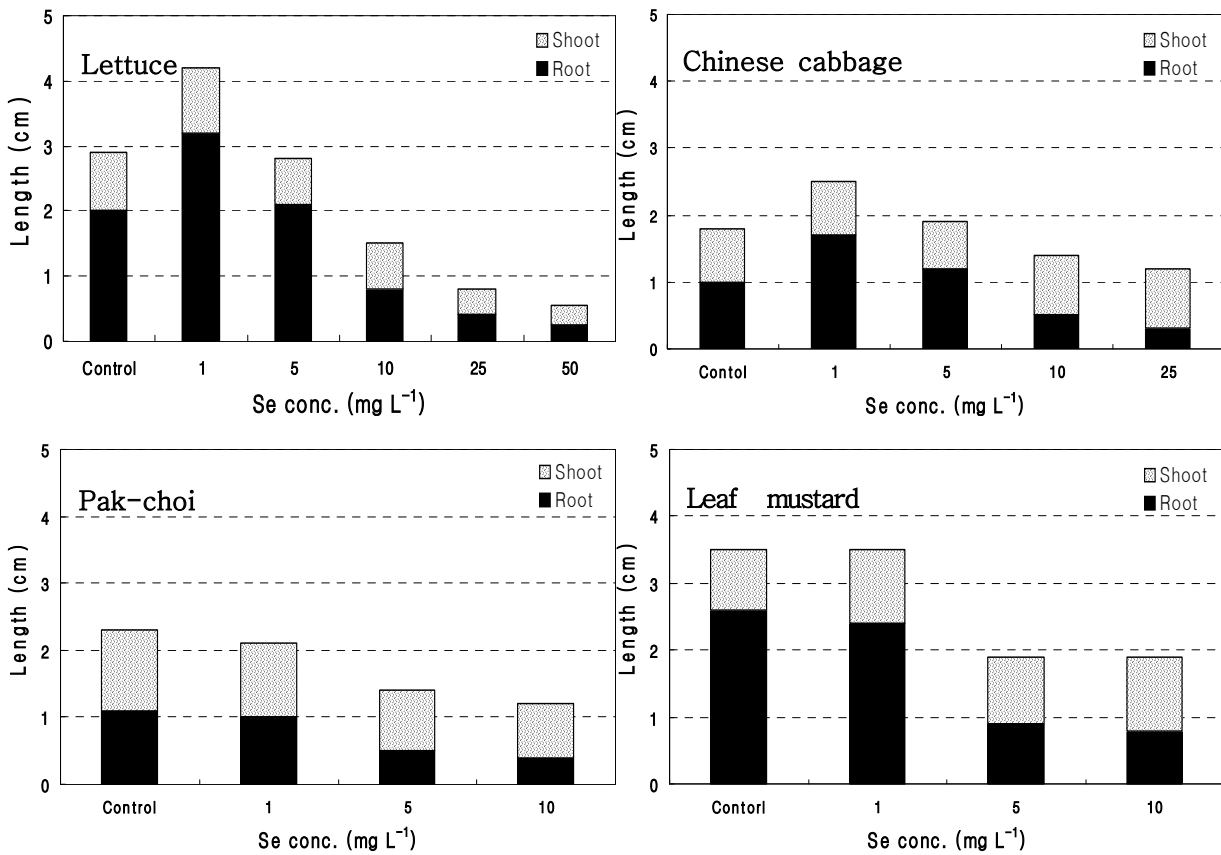


Fig. 3-9. 셀레늄 농도에 따른 발아 6일 후 채소종자별 초장 및 근장 비교

#### 다. 셀레늄 흡수특성

발아 6일 후에 표본식물을 채취하여 증류수에 3회 세척한 후 70°C dry oven에서 36 hr 건조시킨 후 [제1절]에서 제시한 방법으로 식물체내 셀레늄흡수량을 조사한 결과(Fig. 3-10), 발아된 채소 종자식물의 셀레늄 흡수는 셀레늄 처리농도가 높을수록 흡수량이 비례적으로 증가하였다. 채소 종자식물별 셀레늄 흡수정도는 청경채>배추>갓>상추 순이었다. 채소종자별 발아 및 성장에 저해를 받지 않는 적정 셀레늄 처리 범위는 상추 및 배추는 1~5 mg L<sup>-1</sup> 범위, 청경채 및 갓은 1 mg L<sup>-1</sup>이내가 적당한 것으로 나타났다.

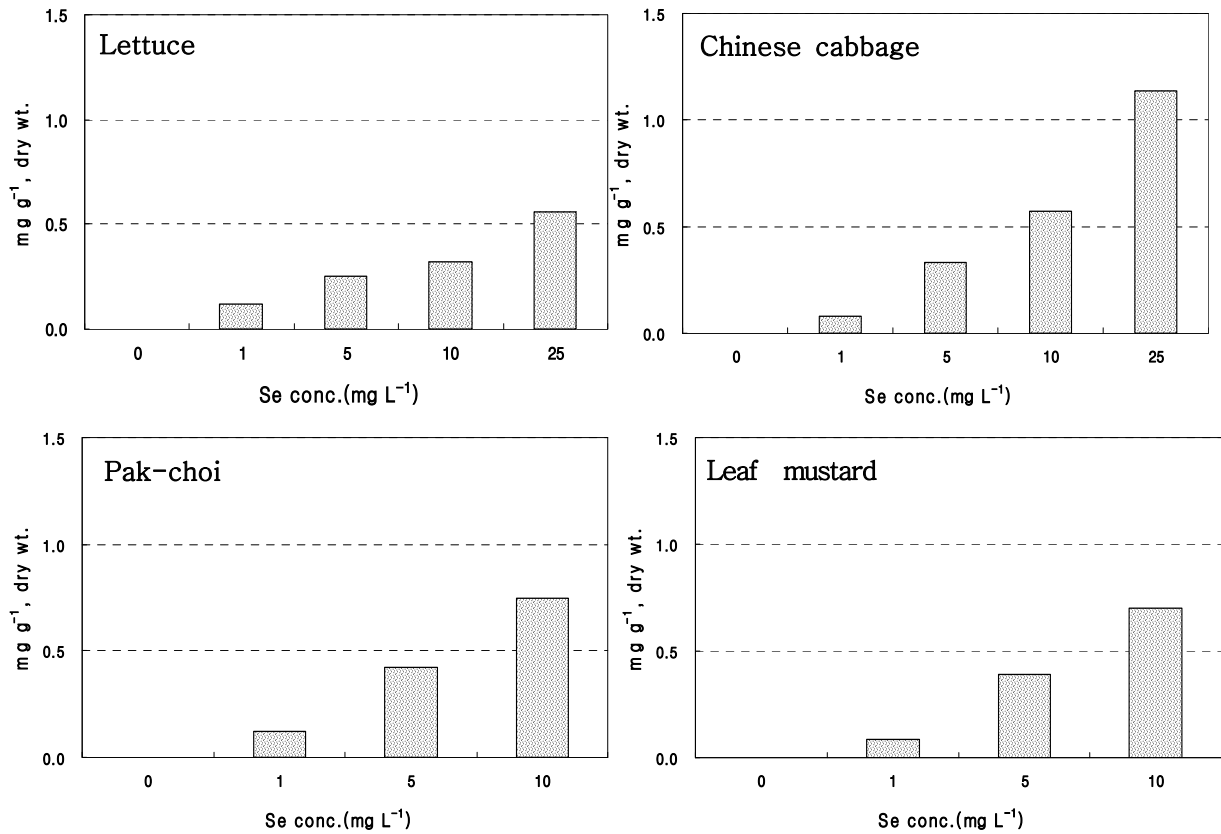


Fig. 3-10. 셀레늄 농도에 따른 발아 6일 후 채소종자식물별 셀레늄 흡수량 비교

#### 4. 연구결과 요약

식물의 종자발아와 유묘생장에 미치는 게르마늄과 셀레늄의 효과와 흡수특성을 조사하기 위하여, 대표적인 채소류인 상추, 갓, 배추 및 청경채를 이용하여 셀레늄과 게르마늄 농도에 따른 종자발아율, 유묘 성장특성 및 게르마늄 흡수 특성을 조사하였다.

게르마늄 처리에 의한 채소 종자발아는 모든 식물에서 무기게르마늄을 100 mg L<sup>-1</sup> 처리한 경우에만 약간의 저해를 받았고 나머지 조건에서는 거의 영향을 받지 않았다. 식물의 유묘생장에 미치는 게르마늄의 효과는 갓과 배추의 경우에는 모든 농도의 무기게르마늄(10~100 mg L<sup>-1</sup>)에서 뿌리의 성장에 심각한 저해를 보였고 지상부 생장은 높은 농도 (50, 100 mg L<sup>-1</sup>) 에서는 저해를 받지만 낮은 농도 (10, 25 mg L<sup>-1</sup>) 에서는 오히려 약간의 성장 촉진효과를 보이거나 거의 차이가 없는 것으로 보였다.

유기게르마늄의 처리시에는 뿌리와 지상부의 생육이 낮은 농도 (10, 25, 50 mg L<sup>-1</sup>)의 대부분 조건에서 성장을 촉진하는 결과를 보였다. 식물체내의 게르마늄의 흡수 특성은 무기 및 유기게르마늄의 모든 조건에서 대조구에 비해 처리농도가 높아짐에 따라 점진적으로 뚜렷한 증가를 보였다. 특히 무기게르마늄을 처리한 경우보다 유기 게르마늄을 처리한 경우에 같은 농도에서 전반적으로 약 2-4.5배까지 많이 흡수되었다. 25 mg L<sup>-1</sup> 농도의 게르마늄을 처리한 경우를 보면, 유기게르마늄의 처리시 게르마늄의 흡수는 갓에서는 약 4배 (무기게르마늄: 0.37 mg g<sup>-1</sup>dw, 유기게르마늄: 1.47 mg g<sup>-1</sup>dw), 배추에서는 약 2.2 배 (무기게르마늄: 0.40 mg g<sup>-1</sup>dw,

유기게르마늄:  $0.86 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$ ) 그리고 청경채의 경우 약 2.1배 (무기게르마늄 :  $0.33 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$ , 유기게르마늄:  $0.70 \text{ mg g}^{-1}\text{dw}$ ) 정도로 무기게르마늄의 처리보다 높았다.

셀레늄 농도에 따른 채소종자별 발아특성은 전반적으로 상추와 배추는 발아율에 저해가 없었으나, 청경채와 갓은 농도가 높아짐에 따라 초기 발아율에 저해를 받았으며, 발아 1일째 청경채는  $50 \text{ mgL}^{-1}$ 에서 저해가 뚜렷하였다.

유묘생장에 미치는 셀레늄의 효과는 상추와 배추는 셀레늄 처리농도  $5 \text{ mgL}^{-1}$ 까지는 초기 식물생육 촉진형상을 보였으며 대조구의 길이와 비교하였을 때  $1 \text{ mgL}^{-1}$  농도에서 상추는 1.5배 배추는 1.4배 증가하였다. 청경채와 갓은 셀레늄 처리농도  $1 \text{ mgL}^{-1}$ 에서는 대조구와 같거나 비슷하였으나,  $5 \text{ mgL}^{-1}$  이후부터는 농도가 높아짐에 따라 대조구에 비해 뿌리의 생육에 저해를 받았다.

유묘의 식물체내 셀레늄 흡수는 셀레늄 처리농도가 높을수록 흡수량이 비례적으로 증가하였다. 채소 종자식물별 셀레늄 흡수정도는 청경채>배추>갓>상추 순이었다. 채소종자별 발아 및 생장에 저해를 받지 않는 적정 셀레늄 처리 범위는 상추 및 배추는  $1\sim 5 \text{ mgL}^{-1}$  범위, 청경채 및 갓은  $1 \text{ mgL}^{-1}$ 이내가 적당한 것으로 생각되었다.

## II. 게르마늄 함유 기능성 상추 수경재배 기술 개발

### 1. 공시 상추

게르마늄 함유 기능성 상추 수경재배 기술을 개발하기 위한 공시 상추는 흥농종묘의 레드선 적축면상추(*Lactuca sativa L.*)를 사용하였다. 파종 후 4주간 키운 육묘를 재배판에 정식한 후 상추를 재배하였다.

### 2. 상추 재배방법

상추 재배방법은 비고형배지경 (소액담액경)과 고형배지경 (필라이트경)의 두가지 재배방식을 이용하였다. 비고형배지경 (소액담액경)의 재배는 재배상을 스티로폼용기(L56 × W44 × H15 cm)로 제작하여 담액수경방식으로 14×14 cm간격으로 재배하였다. 실험에 사용한 양액 (Table 3-2)은 일본원예시험장 표준양액 처방기준에 준하여 표준액의 1/2배액을 사용하였으며 에어펌프를 통하여 통기시켰다. 고형배지경 (필라이트경)에 사용된 베드는 규격을 L 500cm × W 80cm × H 40cm인 스티로폼수지 성형베드로서 베드 하단에 나일론 천을 설치하고, 배지는 perlite를 30cm 깊이로 충전하였다. 공급양액은 베드 상단에 점적호수를 2줄로 설치하고 점적식으로 공급하였다. 양액농도는 정식후 2주 동안은 일본원예시험장 처방액의 1/2배액을, 그 이후에는 3/4배액을 순환펌프와 타이머를 이용하여 하루에 3시간 간격으로 5분씩 공급하였으며, 비순환식으로 관리하였다.

Table 3-2. 일본원예시험장 표준배양액 처방

Fertilizer	Concentration(mg·L <sup>-1</sup> )	
	1.0×	0.5×
KNO <sub>3</sub>	810	405
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	950	475
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	500	250
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	155	77.5
Fe-EDTA	20	20
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	3	3
MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	2	2
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.22	0.22
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.05	0.05
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.02	0.02
EC(dS·m <sup>-1</sup> )	2.2	1.7
pH	6.2	6.8

### 3. 게르마늄처리

유기게르마늄 [Ge-132, Carboxyethyl germanium sesquioxide 3(GeCH<sub>2</sub>COOH)<sub>2</sub>, Sigma]과 무

기게르마늄 [GeO<sub>2</sub>, Sigma] 2종류 각각을 필요에 따라 농도별로 제조하여 시험목적에 따라 달리 처리하였다.

#### 4. 처리 시험별 상추 생육특성 조사

시험 처리방법에 따른 상추의 생육특성은 증식후 2주 동안 배양 후 처리구당 12개체의 상추를 취하여 생체중, 건물중, 초장, 엽수, 엽색도 등을 조사하였다.

#### 5. 상추내 게르마늄 및 일반성분 분석

상추내 흡수된 게르마늄 및 일반성분 함량을 분석하기 위하여 증식후 2주동안 배양한 다음 각 처리구마다 12개의 상추를 채취하여 증류수에 3회 세척한 후 70°C dry oven에서 48hr 건조시킨 후 분쇄하여 [제1절]에서 구명된 시료 전처리방법으로 전처리하여 ICP-AES 또는 ICP-MS를 이용하여 분석 하였다.

#### 6. 양액내 게르마늄 안정화 정도 검토

##### 가. 양액 농도에 따른 게르마늄 용해도 변화

양액에 게르마늄 처리시 양액 중에 존재하는 다른 이온들과 침전형의 화합물형태로 전환됨으로서 식물 가용성 게르마늄 농도가 감소될 수 있다. 따라서 양액 중에 첨가한 게르마늄의 안정화 정도를 검토하기 위하여 증류수, 본 실험에 사용한 양액 0.5배액 및 1.0배액 각각에 게르마늄의 농도를 10 ppm으로 고정하여 양액조성에 따른 게르마늄 용해도를 조사한 결과(Table 3-3), 유기게르마늄과 무기게르마늄 모두 양액조성과 농도에 따른 가용성 게르마늄의 농도변화는 없었다.

Table 3-3. 양액 조성에 따른 게르마늄 용해도 변화

	GeO <sub>2</sub>	Ge-132
	(mg L <sup>-1</sup> )	
D.W	10.47	10.52
양액 0.5배액	10.46	10.47
양액 1.0배액	10.44	10.52

##### 나. pH에 따른 게르마늄 용해도 및 일반성분 변화

양액내 pH 변화에 따른 게르마늄 및 일반 성분 용해도 변화를 검토하기 위하여 게르마늄의 농도를 10 ppm으로 고정하고 HNO<sub>3</sub>와 NH<sub>4</sub>Cl 용액으로 pH를 pH 3-9 범위로 조정하여 게르마늄 용해도 및 일반성분 변화를 조사하였다. pH변화에 따른 게르마늄의 용해도(Table 3-4)는 pH 조정 중 pH 조정 시약과 양액내 성분과의 약간의 침전현상은 보였으나 게르마늄의 용해도는 모두 큰 차이가 없었다.

pH 변화에 따른 게르마늄의 일반 식물영양원소 농도변화(Table 3-5, 3-6)는 Ca과 P를 제외한 다른 원소들은 모든 pH 범위에서 변화가 없었으며, Ca과 P는 pH 8 이상에서 농도가 크게 감소되었다.

Table 3-4. pH변화에 따른 게르마늄 용해도 변화

	D.W		양액 0.5배액		양액 1.0배액	
	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	GeO <sub>2</sub>	Ge-132
	(mg L <sup>-1</sup> )					
pH 3	10.32	10.64	10.93	10.52	10.35	10.54
pH 4	10.33	10.26	10.99	10.29	10.43	10.73
pH 5	10.35	10.14	10.96	10.57	10.25	10.63
pH 6	10.36	10.78	10.89	10.93	10.45	10.66
pH 7	10.36	10.23	10.63	10.87	10.66	10.89
pH 8	10.33	10.48	10.31	10.38	10.46	10.26
pH 9	10.59	10.74	10.02	10.30	10.37	10.75

Table 3-5. pH변화에 따른 양액내 식물영양원소 농도 변화 (무기게르마늄 처리 양액)

	K	Ca	Mg	Na	Cu	Fe	Mn	Mo	P	B
	(mg L <sup>-1</sup> )									
pH 3	281.24	148.89	43.31	3.98	0.00	0.19	0.33	0.01	39.63	0.54
pH 4	292.21	132.50	44.93	3.92	0.00	0.19	0.32	0.01	39.37	0.53
pH 5	290.29	130.76	44.74	2.77	0.00	0.18	0.31	0.02	39.10	0.53
pH 6	292.37	127.62	44.03	3.34	0.00	0.19	0.30	0.02	38.42	0.53
pH 7	284.05	126.04	43.70	2.36	0.00	0.18	0.28	0.02	37.72	0.52
pH 8	290.58	99.63	41.93	3.54	0.00	0.13	0.00	0.02	21.64	0.59
pH 9	287.28	82.41	38.68	4.02	0.02	0.09	0.00	0.01	11.58	0.52

Table 3-6. pH변화에 따른 양액내 식물영양영양원소 농도변화 (유기게르마늄 처리 양액)

	K	Ca	Mg	Na	Cu	Fe	Mn	Mo	P	B
	(mg L <sup>-1</sup> )									
pH 3	291.73	129.46	44.91	4.57	0.00	0.19	0.32	0.02	38.59	0.61
pH 4	287.24	127.62	44.47	3.00	0.00	0.18	0.31	0.03	38.55	0.53
pH 5	293.38	129.19	45.20	3.93	0.00	0.18	0.31	0.03	38.91	0.54
pH 6	292.85	126.67	44.47	3.37	0.01	0.18	0.30	0.04	38.38	0.54
pH 7	279.62	126.15	44.47	3.59	0.00	0.17	0.28	0.03	37.97	0.54
pH 8	294.59	92.89	43.08	5.55	0.02	0.12	0.00	0.03	17.78	0.54
pH 9	276.79	85.49	40.23	5.24	0.01	0.08	0.00	0.03	12.66	0.53

다. 외부 온도 수준별 게르마늄 용해도 변화

일부 게르마늄 농자재 생산업체에서 게르마늄 비료를 20℃ 이하의 찬 곳에서 장시간 보관하면 비료 중에 용해되어 있는 게르마늄 이온이 불용성의 무기게르마늄산화물 형태의 화합물로 침전되므로 따뜻한 장소에서 보관하도록 권장하고 있다. 따라서 온도 수준별 게르마늄 용해도 변화를 확인하기 위하여 본 연구에서 제조한 무기 및 유기게르마늄 용액과 구입한 시판 게르마늄액상제제를 서로 다른 온도(4, 10, 20, 30℃)에서 보관하면서 10일 간격으로 30일 동안의 게르마늄의 함량변화를 조사하였다(Table 3-7). 온도 수준별 용액내 게르마늄 농도는 보관 20 일째부터 30℃에서는 게르마늄 용액내 약간의 침전현상을 보이긴 하였으나 모든 온도 및 제품에서 게르마늄 함량변화에 뚜렷한 큰 차이는 없었다.

Table 3-7. 온도 수준별 게르마늄 용해도

	보관 후 10일째				보관 후 20일째				보관 후 30일째			
	4℃	10℃	20℃	30℃	4℃	10℃	20℃	30℃	4℃	10℃	20℃	30℃
	(mg L <sup>-1</sup> )											
A	936.7	937.6	938.7	937.7	936.0	937.8	937.7	937.2	937.1	936.5	937.5	937.3
B	4334.5	4356.4	4342.5	4345.3	4337.0	4214.2	4465.5	4349.0	4505.5	4498.3	4234.5	4343.7
C	3234.2	3143.5	3241.1	3132.2	3242.8	3264.1	3225.4	3237.1	3196.6	3232.7	3120.7	3175.2
D	4187.4	4187.2	4124.4	4234.2	4014.3	4083.9	4147.9	4079.9	4206.7	4216.1	4077.1	4043.1
E	1829.4	1833.2	1837.3	1877.3	1963.4	1986.9	1976.7	1869.2	1622.7	1622.4	1563.4	1566.3
F	635.2	657.2	647.3	587.2	663.3	656.3	636.3	626.4	674.3	643.7	591.7	488.7
G	1434.5	1487.5	1573.2	1473.2	1473.5	1478.3	1587.5	1435.3	1422.6	1566.4	1490.7	1399.2
H	4238.3	4218.4	4138.4	4233.3	4160.2	4092.2	4123.4	4167.4	4181.1	4364.5	4105.8	4091.5
I	94.4	93.0	98.3	98.8	94.4	96.9	100.4	99.6	99.6	97.6	100.6	99.4

A : 유기게르마늄(Ge-132), B : 무기게르마늄(GeO<sub>2</sub>), C: (주)캐러스; Ge-토양관주용, D : (주) 캐러스; Ge-엽면시비용, E : (주) K&C바이오; 지이-업 10호, F : (주) K&C바이오; 셀레마니 10호, G: (주) K&C바이오; 무기게르마늄, H : (주) 파워어스; 천연게르마늄 파워저마, I : 무기 셀레늄(SeO)



## 7. 양액재배방식별 상추 생육특성 및 게르마늄 흡수특성 비교 검토

상추 양액재배방법으로 고행배지경 (필라이트경)과 비고행배지경 (소형담액경)을 이용하여 상추 육묘 증식 후 게르마늄 종류 (유기, 무기)별, 농도별 (0, 1, 3, 5 mg L<sup>-1</sup>)로 아래와 같은 방법으로 처리하여 정식 2주 후의 생육특성과 게르마늄 흡수량을 비교 검토하였다.

고행배지경 (필라이트경) 베드를 이용한 상추 재배시 게르마늄 처리는 정식 후 조제한 각 게르마늄 용액을 상추 1포기당 1일 100 ml씩을 5회에 나누어 관주처리 하였다. 비고행배지경(소형담액경)의 게르마늄 처리는 게르마늄을 농도별로 조정된 양액 20L을 넣은 소형담액경 용기에 상추 육묘 6포기를 정식하였으며, 모든 처리구는 최소 5반복 이상으로 시험하였다.

생육 2주 후의 상추생육 특성 및 상추내 (잎+뿌리) 게르마늄 흡수량을 조사한 결과 (Fig. 3-11, Table 3-8), 재배방법에 따른 상추 생육은 고행배지경 및 비고행배지경 모두 큰 차이는 나타나지 않았다. 게르마늄 종류에 따른 생육은 유기게르마늄 (Ge-132) 처리구에 비하여 무기게르마늄 (GeO<sub>2</sub>) 처리구에서 생육이 전반적으로 약간 감소되는 경향이었으며, 유기게르마늄 처리구에서는 모든 농도 범위에서 대조구에 비하여 생육이 약간 촉진되는 경향이었고, 무기게르마늄 처리구에서는 생육 저해 현상이 뚜렷하게 나타났다.

재배방법별 상추내 게르마늄 흡수량은 고행배지경에 비하여 비고행배지경에서 5배 이상 높은 것으로 나타났는데, 이는 고행배지경 재배시 시비된 게르마늄 총 함량이 비고행배지경의 약 1/2 수준이었고, 또한 비고행배지경에 비하여 시비된 게르마늄 용액이 빠른 시간내에 근권부위로 부터 이탈되는 현상과 배지로 사용한 필라이트 자체에 게르마늄이 흡착되어 식물이 쉽게 이용할 수 없는 형태로 되었기 때문인 것으로 생각된다. 상추내 흡수된 게르마늄 총량은 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마늄 처리구에서 매우 높았으며 처리농도가 높을수록 식물체내 게르마늄 흡수량도 증가되었다.

따라서 본 연구에서는 재배시설관리 측면과 게르마늄 식물 이용의 효율성 등을 고려하여 이후의 수경재배방식은 모두 소형담액경을 이용한 비고행배지경으로 하였다.



Fig. 3-11. 비고형배지경(상)과 고형배지경(하)의 상추재배 전경

Table 3-8. 고형배지경과 비고형배지경의 상추 생육특성 및 게르마늄 흡수량

Ge species	Ge conc. (mg L <sup>-1</sup> )	고형배지경(필라이트경)			비고형배지경(소형담액경)		
		Fresh wt. (g)	Lenght (cm)	Ge (mg kg <sup>-1</sup> , dry wt.)	Fresh wt. (g)	Lenght (cm)	Ge (mg kg <sup>-1</sup> , dry wt.)
GeO <sub>2</sub>	0	21.83 ±1.83 <sup>¶)</sup>	49.8 ±7.36	0.00 ±0.00	16.23 ±4.37	40.22 ±7.53	0.00 ±0.00
	1	21.57 ±0.82	50.12 ±0.56	17.1 ±2.45	18.55 ±9.40	44.30 ±9.31	135.45 ±7.26
	3	21.13 ±1.41	52.42 ±0.08	43.45 ±3.35	19.30 ±2.52	36.32 ±3.43	294.48 ±4.58
	5	20.63 ±1.61	41.40 ±0.25	78.54 ±4.64	15.63 ±7.40	25.43 ±4.50	524.18 ±6.47
	1	23.57 ±0.51	50.28 ±9.50	35.39 ±3.15	25.25 ±5.68	49.30 ±8.48	175.61 ±3.48
Ge-132	3	21.27 ±0.72	52.50 ±10.71	76.12 ±1.75	19.45 ±7.12	38.17 ±6.24	423.24 ±5.51
	5	23.84 ±0.87	58.13 ±6.01	124.57 ±3.58	22.45 ±9.02	48.67 ±3.58	804.94 ±9.51

¶) Mean±Standard deviation

8. 상추생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도범위 구명

비고형배지경 (담액경) 수경재배방법을 이용하여 상추재배시 상추생육에 대한 게르마늄 독성발생 범위를 검토하기 위하여 게르마늄을 0, 2.5, 5, 10, 25, 30, 50 mg L<sup>-1</sup> 등의 여러 가지 농도에서 상추 생장반응과 생체내 게르마늄 흡수 정도를 조사하였다.

가. 상추 생육특성

상추의 생육특성은 유기게르마늄 처리에 비하여 무기게르마늄 처리구에서 생육이 크게 저해되었으며 처리농도가 높아질수록 저해정도가 더 크게 나타났다. 특히 무기게르마늄 처리에 의해서 뿌리의 길이 생장이 저해를 받는 것으로 보였다. 유기게르마늄 처리구의 경우 처리농도 5 및 10 mg L<sup>-1</sup>에서는 대조구에 비하여 초장이 증가되었으며 30 mg L<sup>-1</sup> 및 50 mg L<sup>-1</sup> 처리에서는 감소되었다. 무기게르마늄 처리구의 경우에는 모든 처리농도에서 초장이 크게 감소되었으며 30 및 50 mg L<sup>-1</sup> 처리농도에서는 거의 생장을 못하였다 (Fig. 3-12, 3-13).

생체중 (Fig. 3-14)도 초장과 비슷한 패턴을 보였으며 총 생체무게중 뿌리가 차지하는 비율이 80%이상이었다. 엽색도 (Fig. 3-15)는 무기 및 유기게르마늄 모두에서 처리농도가 높을수록 엽색도가 증가되었다.



Fig. 3-12. 양액내 게르마늄 처리 농도별 생육상태

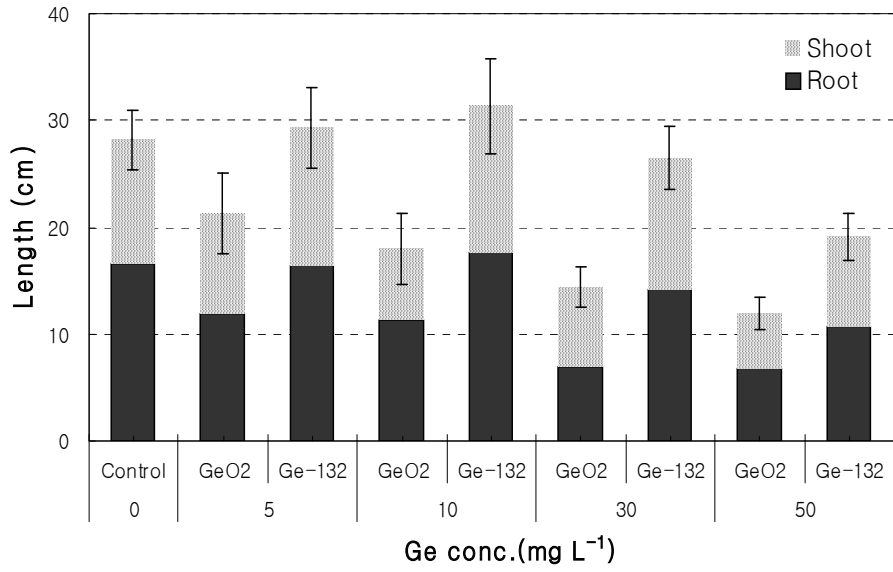


Fig. 3-13. 게르마늄 처리 농도별 초장 변화

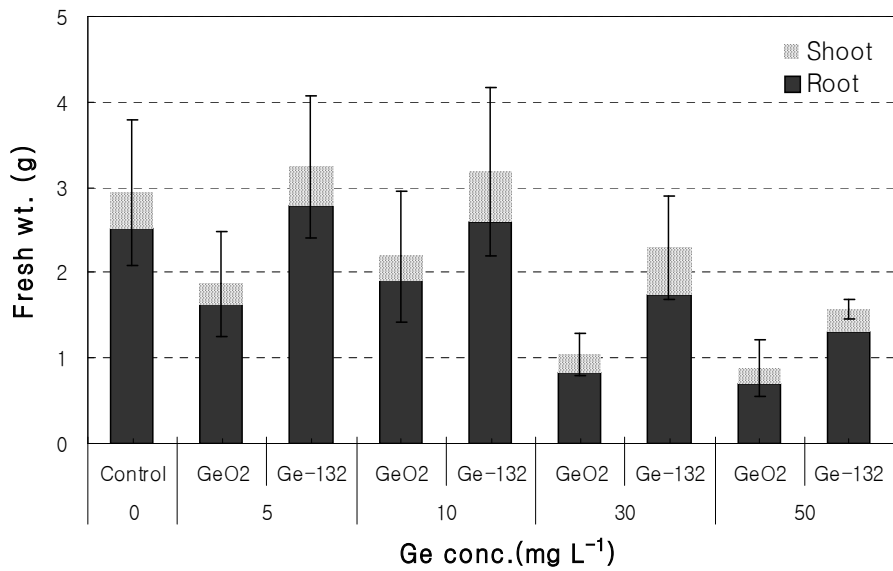


Fig. 3-14. 게르마늄 처리 농도별 생체중 변화

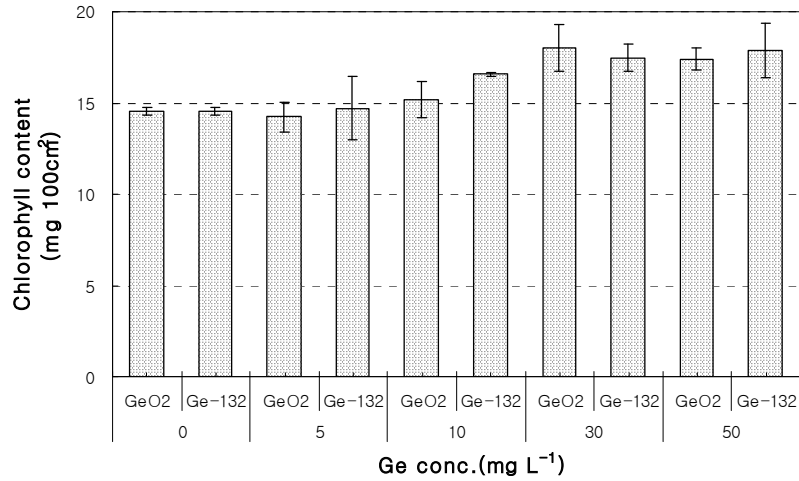


Fig. 3-15. 게르마늄 처리 농도별 엽색도 변화

#### 나. 게르마늄 흡수 특성

상추내 게르마늄 흡수량상 (Fig. 3-16)은 게르마늄 처리농도가 높을수록 생육은 감소하였지만 게르마늄 흡수량은 증가되었다. 게르마늄 종류별 흡수량상은 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마늄 처리구에서의 흡수량이 매우 높았으며, 처리농도 30 및 50 mg L<sup>-1</sup>에서는 무기게르마늄에 비하여 유기게르마늄 처리구의 흡수량이 약 2배 이상 높았다. 그리고 상추내 흡수된 게르마늄 분포도는 유기게르마늄의 경우 대부분이 뿌리에 분포되어 있었으며, 무기게르마늄의 경우 5 및 10 mg L<sup>-1</sup>의 낮은 농도에서는 대부분이 뿌리에 분포되어 있었지만 처리농도 30 및 50 mg L<sup>-1</sup>에서는 잎에 더 많이 분포되어 있었다. 이는 게르마늄 종류와 용액내 게르마늄이온의 농도에 따라 상추내 게르마늄 이동패턴이 달라지는 것으로 생각된다.

이상의 결과들로 볼 때 비고형배지경 (담액경)을 이용하여 게르마늄을 양액내에 바로 처리하여 상추 재배시 생육적인 측면에서는 유기게르마늄의 경우 10 mg L<sup>-1</sup> 범위 이내, 무기게르마늄의 경우에는 5 mg L<sup>-1</sup> 이내가 적당할 것으로 생각된다. 그러나 게르마늄함량이 높은 기능성 상추 생산을 위해서는 게르마늄 처리농도에 따른 biomass생산량, 게르마늄 흡수량 등의 관계를 검토하여 상추내 게르마늄 함량이 표준화 될 수 있는 게르마늄 시비방법이 확립되어야 할 것이다.

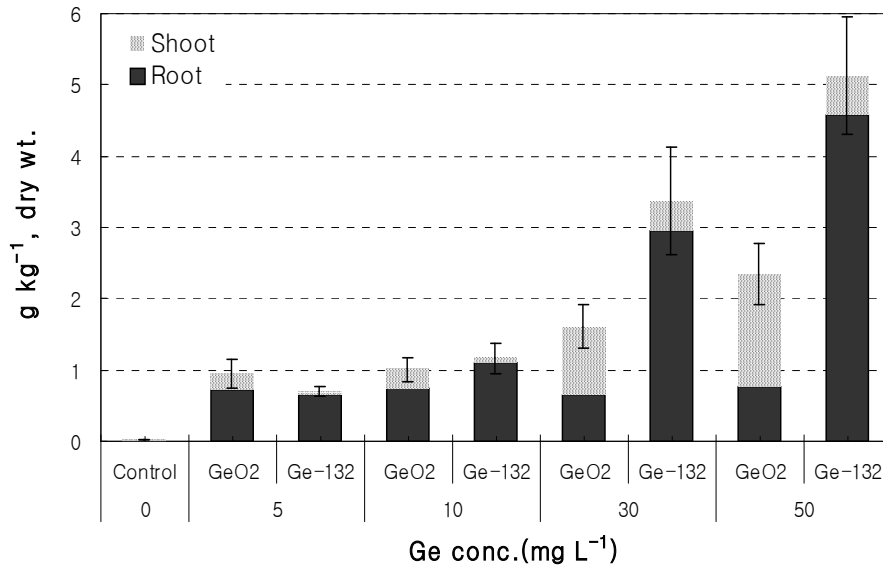


Fig. 3-16. 게르마늄 처리 농도별 상추내 게르마늄 흡수량

다. 게르마늄 엽면처리시 독성발생 범위

게르마늄 엽면처리시 상추 생육에 대한 게르마늄 독성발생 범위를 검토하기 위하여 게르마늄을 농도 (0, 5, 10, 30, 50 mg L<sup>-1</sup>, 0.01% tween 80)별로 조제한 용액 500 ml를 2주 동안에 나누어 엽면처리하여 상추 성장반응과 생체내 게르마늄 흡수 정도를 조사하였다.

(1) 상추 생육특성

상추의 초장 (Fig. 3-17, 3-18)은 유기게르마늄 처리에서는 전 처리농도에서 별 차이가 없었으나 무기게르마늄 처리구에서는 30 및 50 mg L<sup>-1</sup> 농도 처리구에서 약간의 초장 감소가 있었으며, 게르마늄 양액내 처리 시험에서와 마찬가지로 무기게르마늄 처리구에서는 뿌리 생장에 크게 저해를 받았다. 생체중 및 건물중 (Fig. 3-19, 3-20)도 무기게르마늄 처리구에서 약간 감소되었으며, 엽수 (Fig. 3-21)는 유기, 무기게르마늄 처리구 모두 농도에 따른 차이는 없었다



Fig. 3-17. 게르마늄 엽면처리시 농도별 생육상태

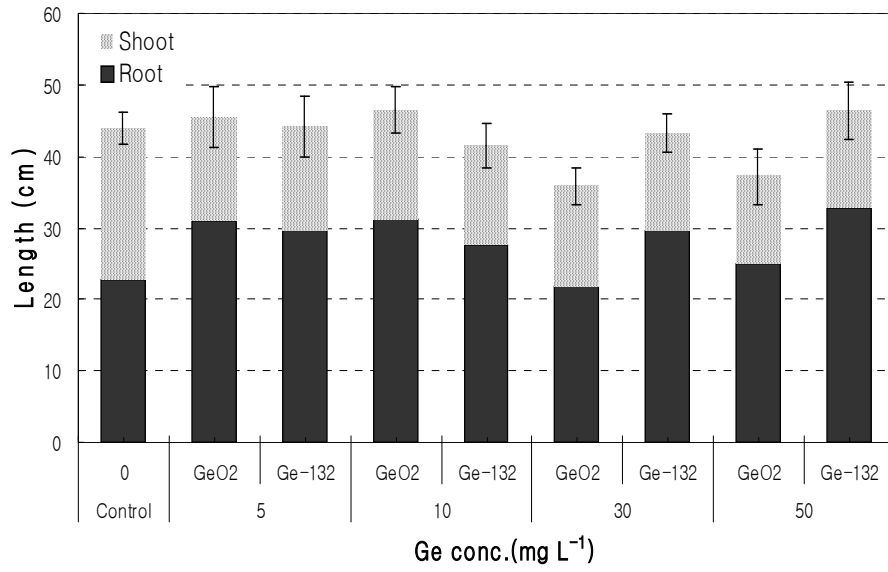


Fig. 3-18. 게르마늄 엽면처리시 농도별 초장 변화

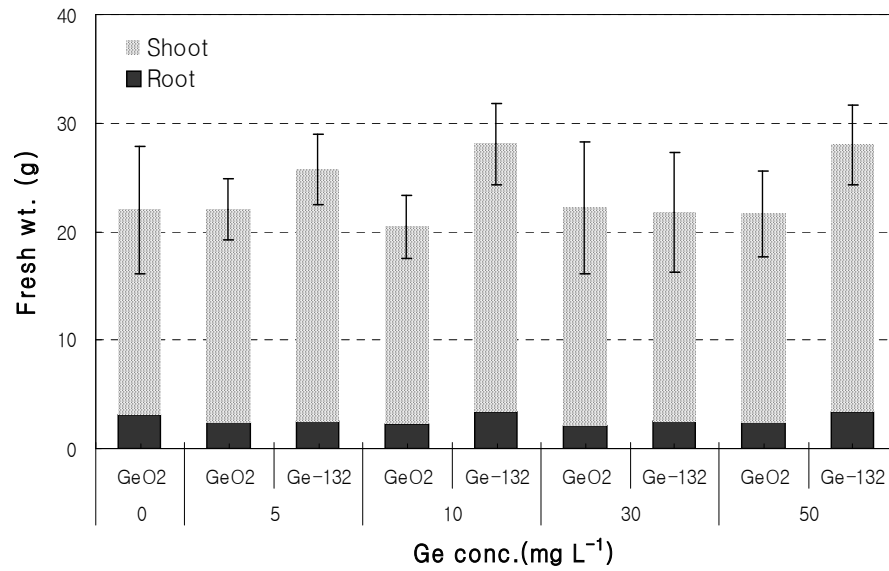


Fig. 3-19. 게르마늄 엽면처리시 농도별 생체중 변화

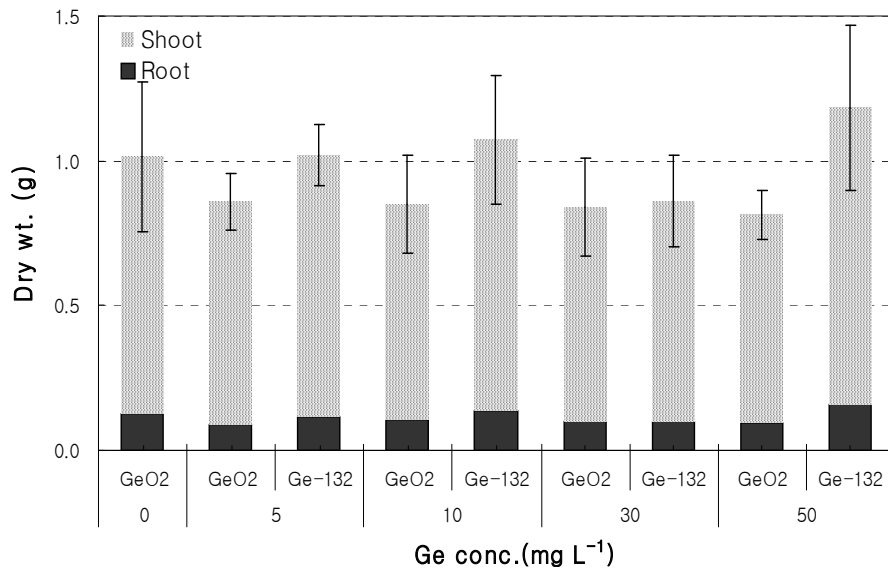


Fig. 3-20. 게르마늄 엽면처리시 농도별 건물중

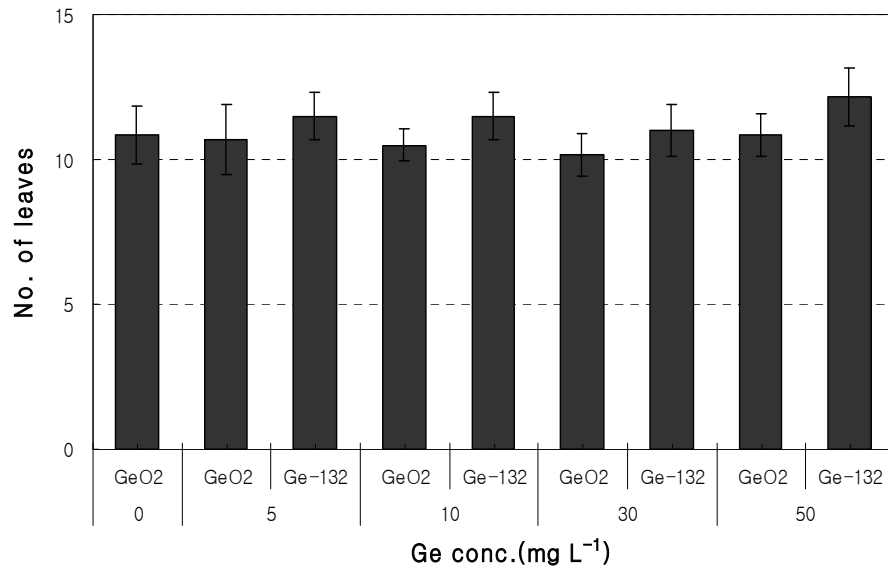


Fig. 3-21. 게르마늄 엽면처리시 농도별 엽수 변화

## (2) 게르마늄 흡수 특성

상추 내 게르마늄 흡수량(Fig. 3-22)은 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마늄 처리구에서 거의 2배 이상 높았으며 게르마늄 처리농가 높을수록 흡수량도 증가되었다. 상추내 흡수된 게르마늄 분포는 무기게르마늄 처리구의 경우에는 거의 대부분이 지상부인 잎에 분포되어 있었으나 유기게르마늄의 경우에는 잎에 약 40%, 뿌리에 약 60%가 분포되어 잎을 통해 흡수된 게르마늄의 상당량이 지하부인 뿌리로 이동된 것으로 나타났다.



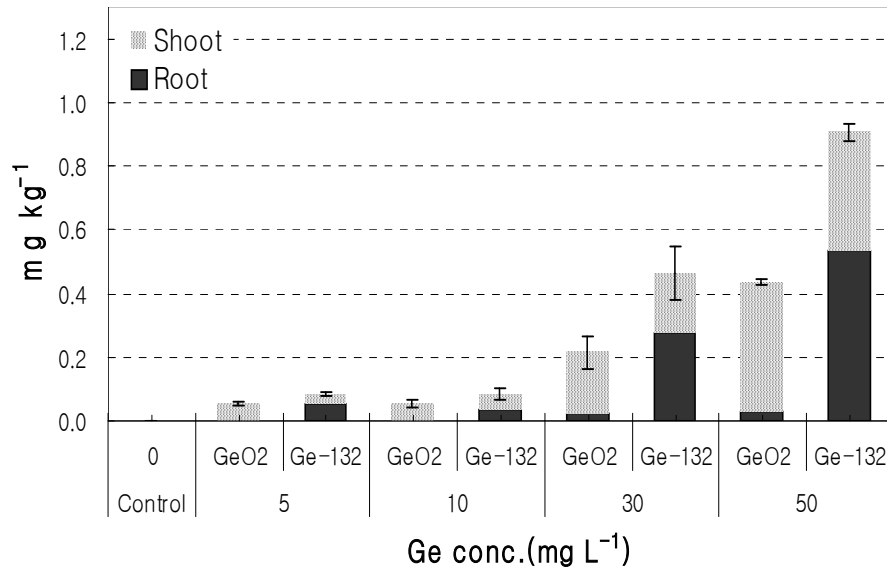


Fig. 3-22. 게르마늄 엽면처리시 농도별 상추내 게르마늄 흡수량

#### 9. 상추 생육촉진 게르마늄 적정 처리농도 구명

상추의 생육촉진을 위한 게르마늄 적정 처리농도를 구명하기 위하여 게르마늄을 0, 1, 2, 3, 4, 5 mg L<sup>-1</sup> 농도가 되도록 양액 내에 처리하여 상추 성장반응과 생체내 게르마늄 흡수 정도를 조사하였다.

##### 가. 상추 생육특성

상추의 초장 (Fig. 3-23, 3-24)은 유기게르마늄 처리구에서는 모두 대조구보다 초장이 증가되었다. 무기게르마늄 처리구의 경우에는 3 mg L<sup>-1</sup> 농도까지는 초장이 대조구와 증가되거나 비슷하였으며, 5 mg L<sup>-1</sup>에서는 감소되었으며, 특히 무기게르마늄 처리농도가 높아질수록 뿌리의 길이 생장이 저해되는 것이 뚜렷하게 관찰되었다. 그리고 생체중 및 건물중 (Fig.3-25, 3-26)도 유기게르마늄 처리구의 경우에는 모두 대조구에 비하여 증가되었고, 무기게르마늄 처리구도 5 mg L<sup>-1</sup> 처리구를 제외한 모든 처리구에서 약간 증가되었다. 엽수 (Fig. 3-27)도 생체중과 비슷한 경향을 보였으며 엽색도 (Fig. 3-28)는 게르마늄 처리농도가 높아질수록 약간씩 증가되었다.



Fig. 3-23. 게르마늄 양액처리 농도별 생육상태

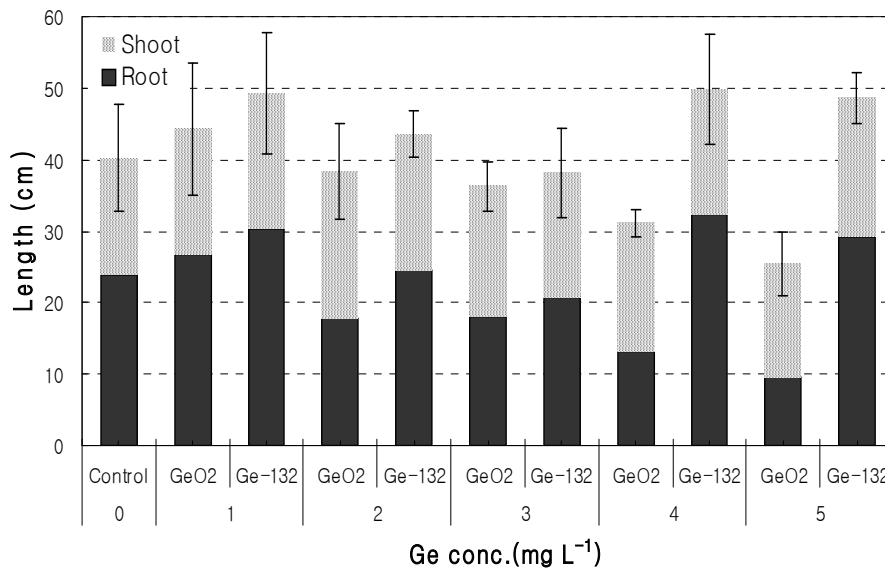


Fig. 3-24. 게르마늄 양액처리 농도별 초장 변화

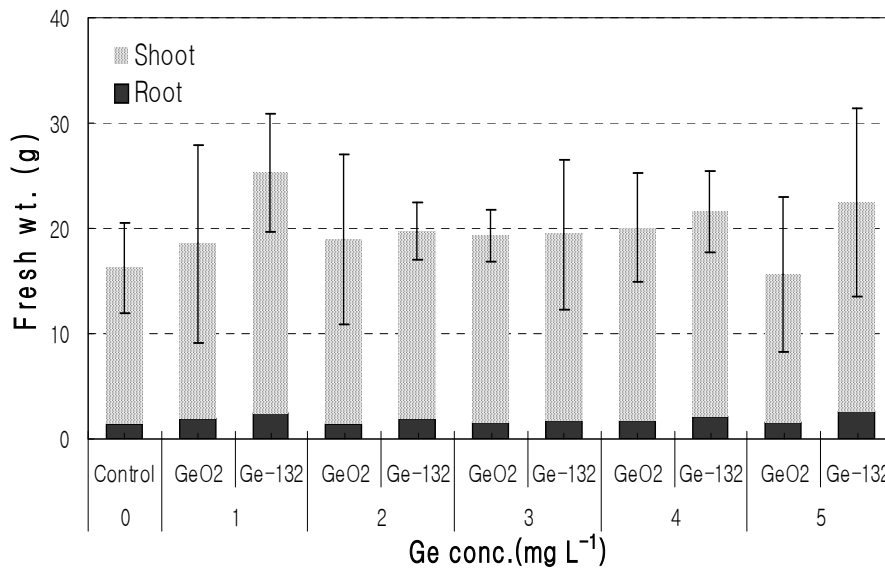


Fig. 3-25. 게르마늄 양액처리 농도별 생체중 변화

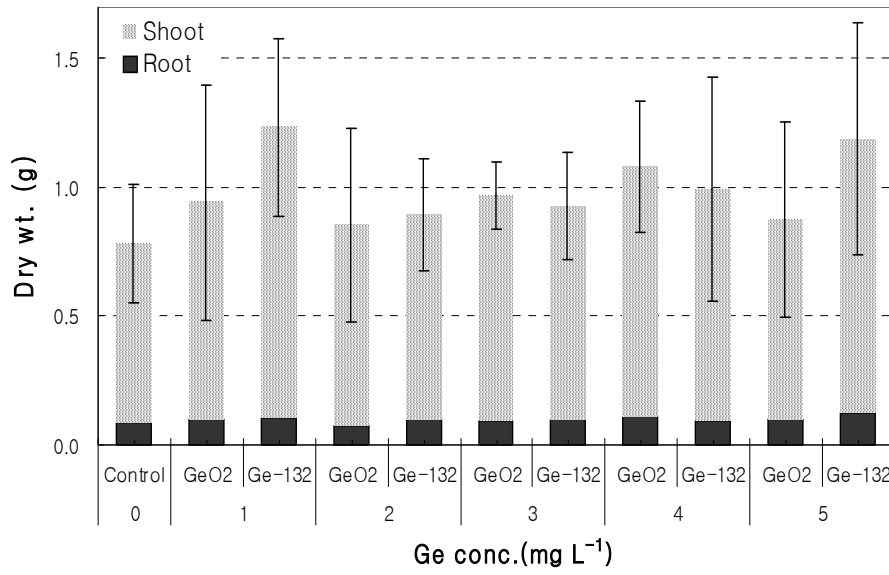


Fig. 3-26. 게르마늄 양액처리 농도별 건물중 변화

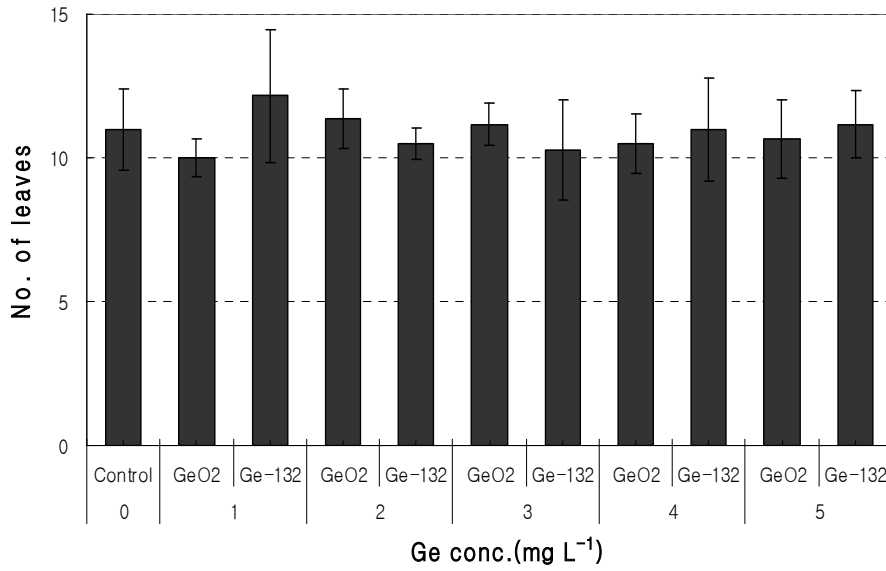


Fig. 3-27. 게르마늄 양액처리 농도별 엽수 변화

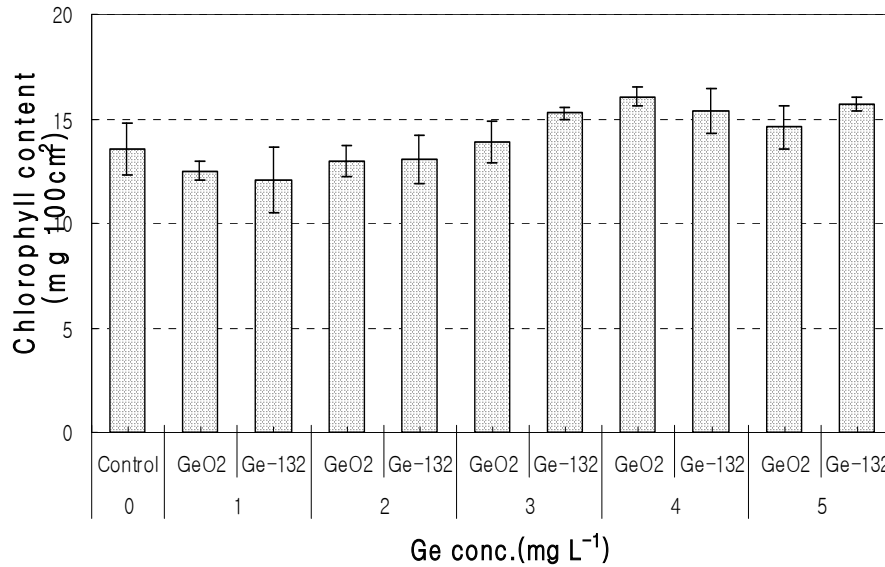


Fig. 3-28. 게르마늄 양액처리 농도별 엽색도 변화

#### 나. 게르마늄 흡수 특성

상추 내 게르마늄 흡수량 (Fig. 3-29)은 게르마늄 처리농도가 높아질수록 흡수량도 비례적으로 증가되었으며, 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마늄 처리구에서 흡수량이 더 많았다. 상추 내 흡수된 게르마늄은 거의 대부분이 뿌리에 분포되어 있었으며, 잎의 게르마늄 함량은 유기게르마늄 처리구에 비하여 무기게르마늄 처리구에서 약간 많았다.

따라서 상추의 생육촉진만을 고려할 때 게르마늄 적정처리농도 (게르마늄 양액내 처리)는 무기게르마늄의 경우에는  $3 \text{ mg L}^{-1}$  이내로 처리하고, 유기게르마늄의 경우에는 본 연구결과들과 상기의 연구결과들 (Fig. 3-12, 13, 14)을 고려할 때  $10 \text{ mg L}^{-1}$  이내로 처리하는 것이 적당할 것으로 판단되었다.

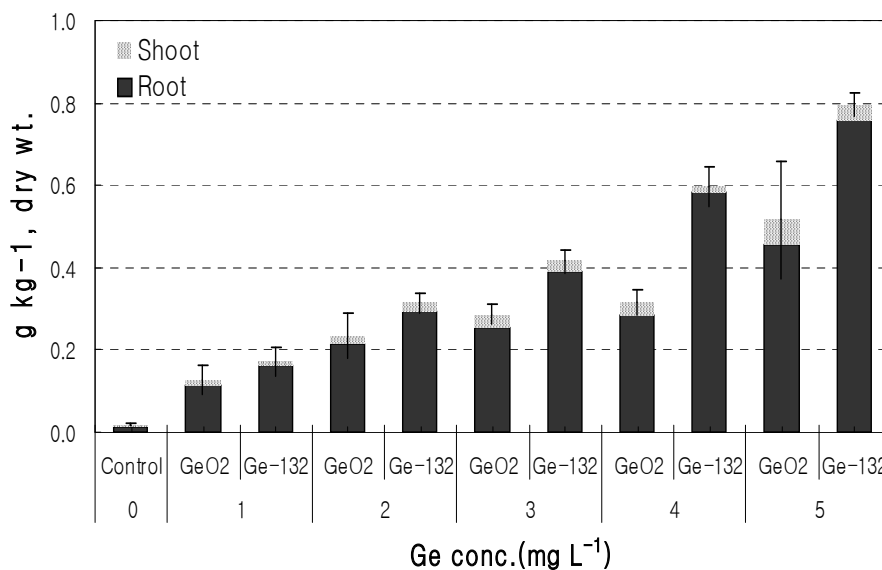


Fig. 3-29. 게르마늄 양액처리 농도별 상추내 게르마늄 흡수량 변화

10. 상추의 게르마늄 흡수 및 식물체내 이동특성

가. 양액 pH별 상추 생육특성 및 게르마늄 흡수 특성

pH는 식물의 무기원소 흡수에 영향을 많이 미치는 중요한 인자이므로 상추의 게르마늄 흡수 역시 pH에 따라 흡수특성이 달라질 수 있을 것으로 생각되어 pH에 따른 상추내 게르마늄 흡수특성을 검토하기 위하여 게르마늄 농도를  $10 \text{ mg L}^{-1}$ 로 고정하고 pH를 pH 4, 5, 6, 7, 8로 각각 조정하여 상추 성장반응과 생체내 게르마늄 흡수특성을 조사하였다. 양액의 pH 조정은  $0.1\text{M-HCl}$ 용액과  $0.1\text{M-NH}_4\text{OH}$  용액을 사용하였다.

pH에 따른 전체적인 생육상황은 유기게르마늄 처리구 및 무기게르마늄 처리구 모두 pH에 따른 특별한 차이점이 없었다 (Fig. 3-30, 3-31, 3-32, 3-33, 3-34).

상추내 게르마늄 흡수특성 (Fig. 3-35)도 예상과는 달리 pH에 따라 게르마늄 종류별 흡수량, 상추 지상부와 지하부의 게르마늄 분포함량 등에서 특별한 차이점 없이 모든 시험 pH 범위에서 일정한 값을 보였다.



Fig. 3-30. 양액 pH별 상추 생육상태

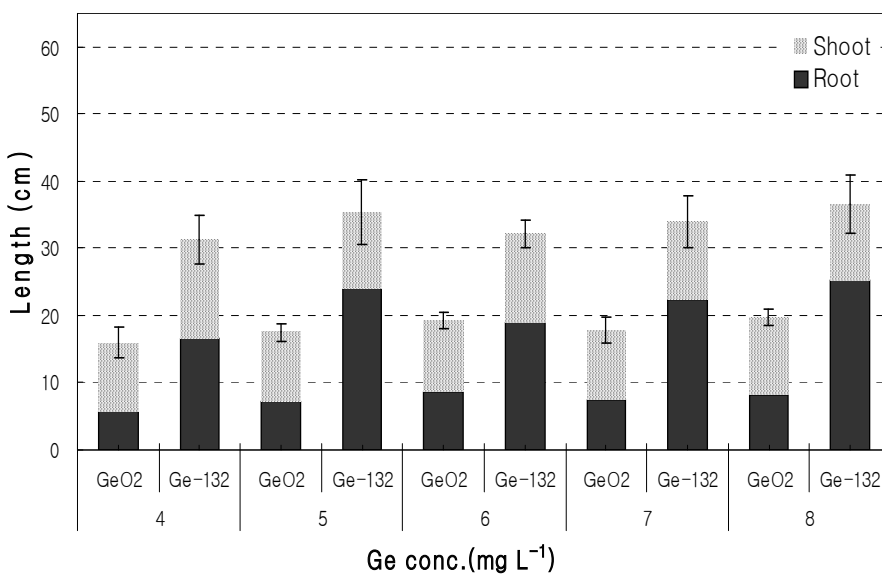


Fig. 3-31. 양액 pH별 상추 초장 변화

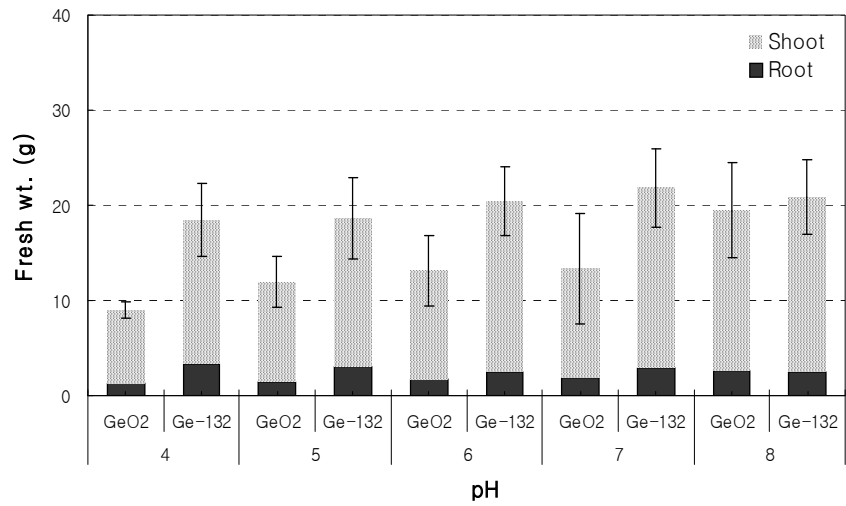


Fig. 3-32. 양액 pH별 상추 생체중 변화

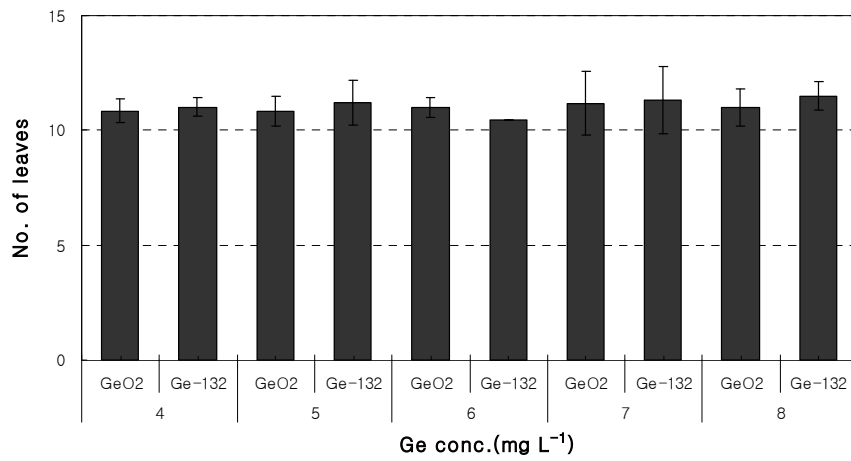


Fig. 3-33. 양액 pH별 상추 엽수 변화

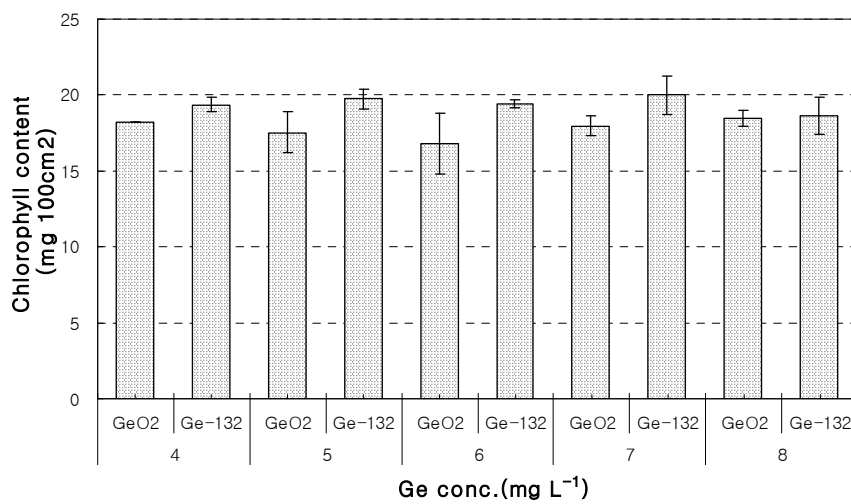


Fig. 3-34. 양액 pH별 상추 엽색도 변화

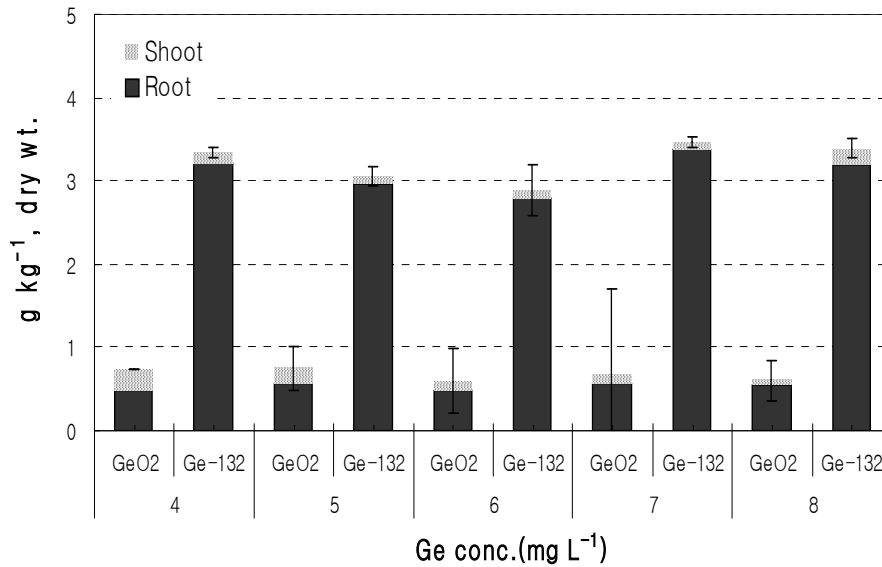


Fig. 3-35. 양액 pH별 상추내 게르마늄 흡수량 변화

#### 나. 상추 부위별 게르마늄 분포 특성

식물체내 게르마늄 흡수특성을 구명하기 위한 상추 재배는 게르마늄 농도를 10 mg L<sup>-1</sup>로 조정된 양액 20L을 넣은 소액담액경의 재배상에 본 잎이 2장인 상추를 6주씩 정식 후 에어펌프를 통하여 통기시키면서 2주간 재배하였다. 재배기간 동안 증산작용과 증발에 의하여 손실되는 양액은 3일 간격으로 양액을 보충하여 20 L이 유지되도록 하였다. 상추 재배 기간동안 투입된 게르마늄 함량은 약 200 mg이다.

식물체내 게르마늄 분포 특성과 이동특성을 구명하기 위하여 상추를 지상부인 Shoot와 지하부인 Root로 구분하고 지상부는 노화 잎 (old leaves), 어린 잎 (young leaves)과 잎 중간의 주엽맥 (stem) 부분으로 구분하였고, 뿌리부분은 주근 (primary roots)과 측근 (lateral roots)으로 세분화하여 각 부위별 게르마늄 분포특성을 비교 검토하였다.

게르마늄 처리에 따른 상추 부위별 게르마늄 함량을 조사한 결과는 Fig. 3-36에서 보는바와 같다. 식물체내 흡수된 전체 게르마늄 함량은 무기게르마늄 처리구에서는 약 0.621 mg g<sup>-1</sup> DW였고, 유기게르마늄 처리구에서는 약 1.1 mg g<sup>-1</sup> DW로서 무기게르마늄에 비하여 유기게르마늄의 흡수량이 약 1.8배 정도 높았다. 상추 지상부와 지하부의 분포정도는 무기게르마늄은 지상부에 약 23.7%, 지하부에 약 76.3%가 분포되어 있었다. 유기게르마늄의 경우에는 지상부에 약 11%, 지하부에 약 89%가 분포되어 잎에 비하여 뿌리에 훨씬 많이 분포되어 있었으며 무기게르마늄에 비하여 지하부인 뿌리에 분포되는 비율이 높았다. 상추 부위별 게르마늄 분포정도는 무기게르마늄의 경우에는 전체적으로 lateral roots (61.4%) ≫ primary roots (14.9%) > old leaves (10.0%) > young leaves (7.2%) > stem (6.4%)순으로 지하부인 측근에 가장 많이 분포되어 있었다. 유기게르마늄의 경우에도 전체적으로 lateral roots (65.9%) ≫ primary roots (23.1%) > stem (4.6%) > old leaves (3.4%) > young leaves (2.9%) 순으로 지하부인 주근과 측근에 많이 분포되어 있었다. 상추 부위별 게르마늄 함량은 지상부인 잎에서는 무기게르마늄

이 유기게르마늄에 비하여 약 1.2배 높게 함유되어 있었고, 지하부인 뿌리에서는 유기게르마늄이 무기게르마늄에 비하여 약 2.1배 높게 분포되어 있었다.

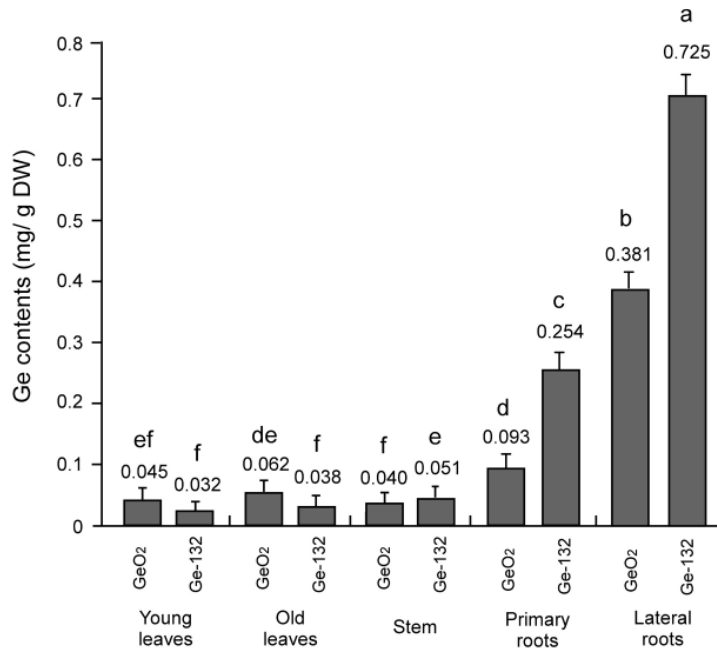


Fig. 3-36. 상추 부위별 게르마늄 분포 함량

### 11. 연구결과 요약

게르마늄이 함유된 기능성 상추 생산을 위한 표준화 수경재배기술을 확립하기 위하여 여러 가지 환경조건에 따른 양액내 게르마늄의 안정화 정도를 검토하고, 양액재배방식별 상추 생육 특성 및 게르마늄 흡수특성 비교 검토하고 상추생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도범위를 구명하였다. 그리고 상추 생육촉진을 위한 게르마늄 적정 처리농도를 구명하고 상추내 게르마늄 흡수특성과 이동특성을 구명하였다.

양액에 게르마늄 처리시 양액 중에 존재하는 다른 이온들과 침전형의 화합물형태로 전환됨으로서 식물 가용성 게르마늄 농도가 감소될 수 있으므로 게르마늄 농도를 10 ppm으로 고정하고 여러 가지 환경조건에 따른 양액내 게르마늄의 안정화 정도를 검토하였다. 증류수와 양액 0.5배액 및 1.0배액 등 양액조성에 따른 게르마늄 용해도는 유기게르마늄과 무기게르마늄 모두 양액조성과 농도에 따른 가용성 게르마늄의 농도변화는 없었다. pH변화에 따른 게르마늄의 용해도는 pH 조정 중 pH 조정 시약과 양액내 성분과의 약간의 침전현상은 보였으나 게르마늄의 용해도는 모두 큰 차이가 없었다. pH 변화에 따른 게르마늄의 일반 식물영양원소 농도변화는 Ca과 P를 제외한 다른 원소들은 모든 pH 범위에서 변화가 없었으며, Ca과 P는 pH 8 이상에서 농도가 크게 감소되었다. 온도 수준별 용액내 게르마늄 농도는 보관 20일째부터 30℃에서는 게르마늄 용액내 약간의 침전현상을 보이긴 하였으나 모든 온도에서 게르마늄 함량변화에 뚜렷한 큰 차이는 없었다.

상추 양액재배방법으로 고품배지경 (필라이트경)과 비고형배지경 (소형담액경)을 이용하여 상추 육묘 정식 후 게르마늄 종류 (유기, 무기)별, 농도별 (0, 1, 3, 5 mg L<sup>-1</sup>)로 정식 2주 후의 생육



특성과 게르마늄 흡수량을 비교 검토하였다. 재배방법에 따른 상추 생육은 고행배지경 및 비고형 배지경 모두 큰 차이는 나타나지 않았다. 게르마늄 종류에 따른 생육은 유기게르마늄(G-132) 처리구에 비하여 무기게르마늄( $\text{GeO}_2$ ) 처리구에서 생육이 전반적으로 약간 감소되는 경향이었으며, 유기게르마늄 처리구에서는 모든 농도 범위에서 대조구에 비하여 생육이 약간 촉진되는 경향이었고, 무기게르마늄 처리구에서는 생육 저해 현상이 뚜렷하게 나타났다. 재배방법별 상추내 게르마늄 흡수량은 고행배지경에 비하여 비고형배지경에서 5배 이상 높은 것으로 나타났으며, 상추내 흡수된 게르마늄 총량은 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마늄 처리구에서 매우 높았으며 처리농도가 높을수록 식물체내 게르마늄 흡수량도 증가되었다.

비고형배지경(담액경) 수경재배방법을 이용하여 게르마늄 양액내 처리와 엽면처리 방법의 상추생육에 대한 게르마늄 독성발생 범위를 검토하였다. 게르마늄 양액내처리시 게르마늄 농도에 따른 상추의 성장반응은 유기게르마늄 처리에 비하여 무기게르마늄 처리구에서 생육이 크게 저해되었으며 처리농도가 높아질수록 저해정도가 더 크게 나타났다. 유기게르마늄 처리구의 경우에 처리농도  $10 \text{ mg L}^{-1}$ 까지는 생육 촉진현상이 있었으며 무기게르마늄 처리구의 경우에는  $5 \text{ mg L}^{-1}$  처리농도 이상에서는 성장반응이 크게 저해되었다. 상추내 게르마늄 흡수량은 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마늄 처리구에서 약간 높았다. 상추내 흡수된 게르마늄은 유기게르마늄 처리구의 경우 대부분이 뿌리에 분포되어 있었으며, 무기게르마늄의 경우 5 및  $10 \text{ mg L}^{-1}$ 의 낮은 농도에서는 대부분이 뿌리에 분포되어 있었지만 처리농도 30 및  $50 \text{ mg L}^{-1}$ 에서는 잎에 더 많이 분포되어 있었다. 이상의 결과들로 볼 때 비고형배지경(담액경)을 이용하여 게르마늄을 양액내에 바로 처리하여 상추 재배시 생육적인 측면에서는 유기게르마늄의 경우  $10 \text{ mg L}^{-1}$  범위 이내, 무기게르마늄의 경우에는  $5 \text{ mg L}^{-1}$  이내가 적당할 것으로 판단되었다.

게르마늄 엽면처리시 상추 생육에 대한 게르마늄 독성발생 범위를 검토하였다. 게르마늄 엽면처리시 상추의 성장반응은 전체적으로 양액내 처리에 비하여 저해를 적게 받았으며, 유기게르마늄 처리에서는 모든 처리농도에서 별 차이가 없었으나 무기게르마늄 처리구에서는 30 및  $50 \text{ mg L}^{-1}$  농도 처리구에서 약간의 성장반응 저해가 있었다. 상추내 게르마늄 흡수량은 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마늄 처리구에서 거의 2배 이상 높았으며 게르마늄 처리농도가 높을수록 흡수량도 증가되었다. 상추내 흡수된 게르마늄 분포는 무기게르마늄 처리구의 경우에는 거의 대부분이 지상부인 잎에 분포되어 있었으나 유기게르마늄의 경우에는 잎에 약 40%, 뿌리에 약 60%가 분포되어 있을 통해 흡수된 게르마늄의 상당량이 지하부인 뿌리로 이동된 것으로 나타났다.

pH는 식물의 무기원소 흡수에 영향을 많이 미치는 중요한 인자이므로 상추의 게르마늄 흡수 역시 pH에 따라 흡수특성이 달라질 수 있을 것으로 생각되어 pH에 따른 상추내 게르마늄 흡수특성을 검토하였다. pH에 따른 전체적인 생육상황은 유기게르마늄 처리구 및 무기게르마늄 처리구 모두 pH에 따른 특별한 차이점이 없었다. 상추내 게르마늄 흡수특성도 예상과는 달리 pH에 따라 게르마늄 종류별 흡수량, 상추 지상부와 지하부의 게르마늄 분포함량 등에서 특

별한 차이점 없이 모든 시험 pH 범위에서 일정한 값을 보였다.

상추내 게르마늄 흡수 특성과 이동특성을 구명하기 위하여 상추를 지상부인 Shoot와 지하부인 Root로 구분하고 지상부는 노화 잎 (old leaves), 어린 잎 (young leaves)과 잎 중간의 주엽맥 (stem) 부분으로 구분하고, 뿌리부분은 주근 (primary roots)과 측근 (lateral roots)으로 세분화하여 각 부위별 게르마늄 분포특성을 비교 검토하였다. 상추내 흡수된 전체 게르마늄 함량은 무기게르마늄 처리구에서는 약  $0.621 \text{ mg g}^{-1} \text{ DW}$ 였고, 유기게르마늄 처리구에서는 약  $1.1 \text{ mg g}^{-1} \text{ DW}$ 로서 무기게르마늄에 비하여 유기게르마늄의 흡수량이 약 1.8배 정도 높았다. 상추 지상부와 지하부의 분포정도는 무기게르마늄은 지상부에 약 23.7%, 지하부에 약 76.3%가 분포되어 있었고, 유기게르마늄의 경우에는 지상부에 약 11%, 지하부에 약 89%가 분포되어 잎에 비하여 뿌리에 훨씬 많이 분포되어 있었다. 상추 부위별 게르마늄 분포정도는 무기게르마늄의 경우에는 전체적으로 lateral roots (61.4%)  $\gg$  primary roots (14.9%) > old leaves (10.0%) > young leaves (7.2%) > stem (6.4%) 순으로 지하부인 측근에 가장 많이 분포되어 있었다. 유기게르마늄의 경우에도 전체적으로 lateral roots (65.9%)  $\gg$  primary roots (23.1%) > stem (4.6%) > old leaves (3.4%) > young leaves (2.9%) 순으로 지하부인 주근과 측근에 많이 분포되어 있었다.

### Ⅲ. 게르마늄함유 기능성 오이 수경재배 기술 개발

#### 1. 공시 재료

##### 가. 공시 오이

공시 오이는 흥농종묘 (주)의 겨우살이청장오이 (Cucumber : *Cucumis sativus L.*)를 사용하였으며, 오이종자를 육묘용 포트에 파종하여 시험목적에 따라 일정 기간 키운 후 사용하였다.

##### 나. 공시 게르마늄

공시 게르마늄은 무기게르마늄 [ $\text{GeO}_2$ , Sigma]과 유기게르마늄 [Ge-132, carboxyethyl germanium sesquioxide  $3(\text{GeCH}_2\text{COOH})_2$ , Sigma] 2종류를 각각  $5,000 \text{ mg L}^{-1}$ 의 stock solution 을 조제하여 시험 목적에 따라 일정농도로 희석 조제하여 사용하였다.

##### 다. 공시 양액

공시 양액은 독성발생 농도범위 등을 구명하기 위한 단기재배와 하우스와 온실에서의 장기 재배용 양액은 일본원예시험장 표준 양액을 1/2배액으로 사용하였다.

Table 3-9. 일본원예시험장 표준배양액 처방

Fertilizer	Concentration ( $\text{mg L}^{-1}$ )	
	1.0×	0.5×
$\text{KNO}_3$	810	405
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	950	475
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	500	250
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	155	77.5
Fe-EDTA	20	20
$\text{H}_3\text{BO}_3$	3	3
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	2	2
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.22	0.22
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.05	0.05
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.02	0.02
EC ( $\text{dS m}^{-1}$ )	2.2	1.7
pH	6.2	6.8

## 2. 게르마늄 및 일반성분 분석

식물체 및 배양 양액 내 게르마늄과 일반성분 분석은 [제1절]에서 구명한 최적 분석조건을 토대로 건조시료 0.2 g을 teflon bomb에 넣은 후 HNO<sub>3</sub> (Merk, Suprapur) 5 ml을 첨가하여 4시간 방치한 후 50°C로 over night시키고 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5 ml (Merk, Suprapur)을 첨가하여 80°C로 2시간 가열하여 유기물을 완전히 분해시켜 3차 증류수를 가하여 10 ml로 정용하여 ICP-MS 또는 ICP로 분석하였다.

## 3. 오이 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위 구명

### 가. 오이종자 발아에 대한 게르마늄 독성발생 농도 조사

오이 종자 발아에 대한 게르마늄의 독성발생 농도범위를 구명하기 위하여 게르마늄 처리 농도별 발아율, 발아종자식물의 생육 특성 및 게르마늄 흡수 정도를 조사하였다. 오이 종자 발아 시험은 petri-dish (90×15 mm)에 흡습지 (ADVANTEC No.2, 90 mm) 1매를 깔고 무기게르마늄 (GeO<sub>2</sub>)과 유기게르마늄 (Ge-132) 각각을 농도별 (0, 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 15 및 20 mg L<sup>-1</sup>)로 각각 5 mL씩 주입한 후 오이 종자를 25립 씩 치상한 후 4°C에서 2일간 저온 처리 한 후 실온 (23°C)에서 발아시켰다. 발아 2일째와 3일째에 게르마늄 농도별 용액을 5 ml을 각각 보충하였다. 발아율은 게르마늄 처리 후 매일 조사하였고, 생육정도는 발아 4일 후에 20개의 표본식물을 선별하여 생체중 및 길이를 측정하였다.

### (1) 발아특성

게르마늄처리에 따른 오이 종자의 발아특성 (Fig. 3-37, Table 3-10)은 전반적으로 유기게르마늄에 비하여 무기게르마늄 처리에서 약간의 초기발아 (발아 1일째) 저해현상이 보였으나 발아 2일 이후에는 유기 및 무기게르마늄 처리 모두 대조구와 비슷한 발아율을 보여 게르마늄 농도 25 mg L<sup>-1</sup>까지는 종자발아에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

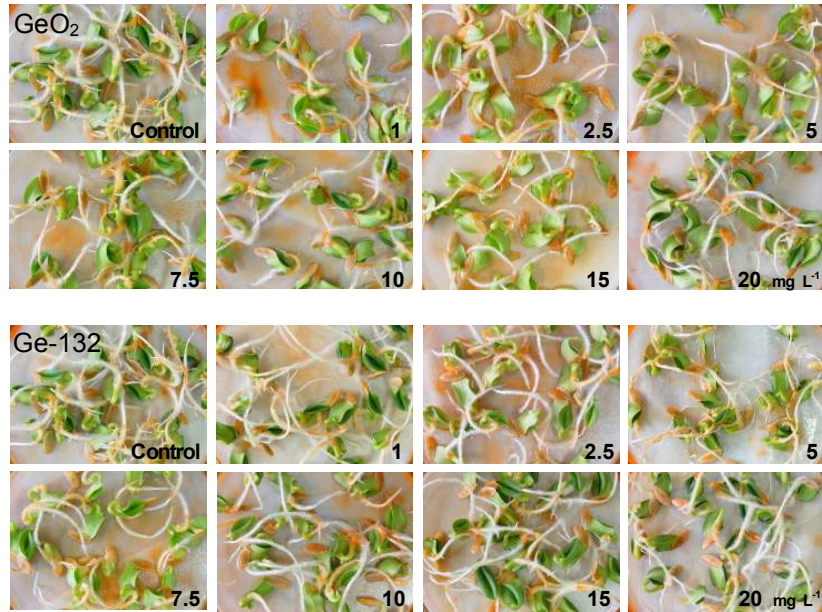


Fig. 3-37. 게르마늄 농도에 따른 발아 4일 후 오이종자 발아상태

Table 3-10. 게르마늄 농도에 따른 채소종자별 발아율

Types of Germanium	GeO <sub>2</sub>								Ge-132							
	Control	0	1	2.5	5	7.5	10	15	20	1	2.5	5	7.5	10	15	20
Concentration (mg L <sup>-1</sup> )	0	1	2.5	5	7.5	10	15	20	1	2.5	5	7.5	10	15	20	
Germination rate (%)	100	100	100	96	100	98	100	100	100	100	100	100	100	100	98	100

(2) 생육특성

게르마늄 농도에 따른 발아된 오이종자식물의 생육상황을 비교 검토하기 위하여 발아 후 4 일째의 전체 길이 (cm plant<sup>-1</sup>) 및 생체중 (g 20 plant<sup>-1</sup>)을 측정 비교하였다 (Fig. 3-38, 3-39, 3-40, 3-41).

게르마늄 종류에 따른 생육정도는 모든 농도에서 유기게르마늄에 비해 무기게르마늄에서 생육저해를 크게 받는 것으로 나타났다. 게르마늄 농도에 따른 생육정도는 전반적으로 유기 및 무기게르마늄 모두 농도가 높아질수록 저해를 받았으며 그 저해정도는 무기게르마늄 처리구에 에서 더 높았다. 게르마늄 처리 농도별 생체중 변화는 무기게르마늄의 경우 처리농도 5 mg L<sup>-1</sup>까지는 비교적 생체중 감소 정도가 낮았지만 7.5 mg L<sup>-1</sup> 이후부터는 크게 감소되었으며, 유기게르마늄의 경우에는 처리농도 7.5 mg L<sup>-1</sup>까지는 대조구와 거의 유사한 생체중을 보였고

10 mg L<sup>-1</sup> 이후부터는 약간 감소되었으나 대조구와 큰 차이는 없었다. 게르마늄 처리농도별 길이변화는 무기게르마늄의 경우에는 처리농도 5 mg L<sup>-1</sup> 이후부터 크게 감소되었으며, 유기게르마늄은 처리농도 10 mg L<sup>-1</sup>까지는 큰 차이가 없었으며 15 및 20 mg L<sup>-1</sup>에서는 저해 정도가 비교적 높은 것으로 나타났으나 무기게르마늄에 비하여 저해정도가 훨씬 적었다.

그리고 무기게르마늄과 유기게르마늄 처리농도별 생체중과 길이 전체의 생육 양상을 무처리구와 비교한 결과 (Fig. 3-39, 3-40), 무기게르마늄의 경우에는 대조구에 비하여 전체적으로 생체중은 약 23%, 길이는 약 31% 감소되었으며, 유기게르마늄 처리구에서는 생체중은 약 7% 정도 감소되어 대조구와 별 차이가 없었으며 길이는 약 20% 정도 감소되었다.

따라서 게르마늄이 오이종자 발아 자체에 미치는 영향은 거의 없었지만 발아 후 종자 생육에는 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 유기게르마늄에 비하여 무기게르마늄이 발아종자 생육에 미치는 영향이 훨씬 컸으며, 오이 종자발아 단계에서의 게르마늄 적정 처리농도는 무기게르마늄의 경우는 5 mg L<sup>-1</sup>이내, 유기게르마늄의 경우에는 10 mg L<sup>-1</sup> 이내가 적당할 것으로 판단된다.

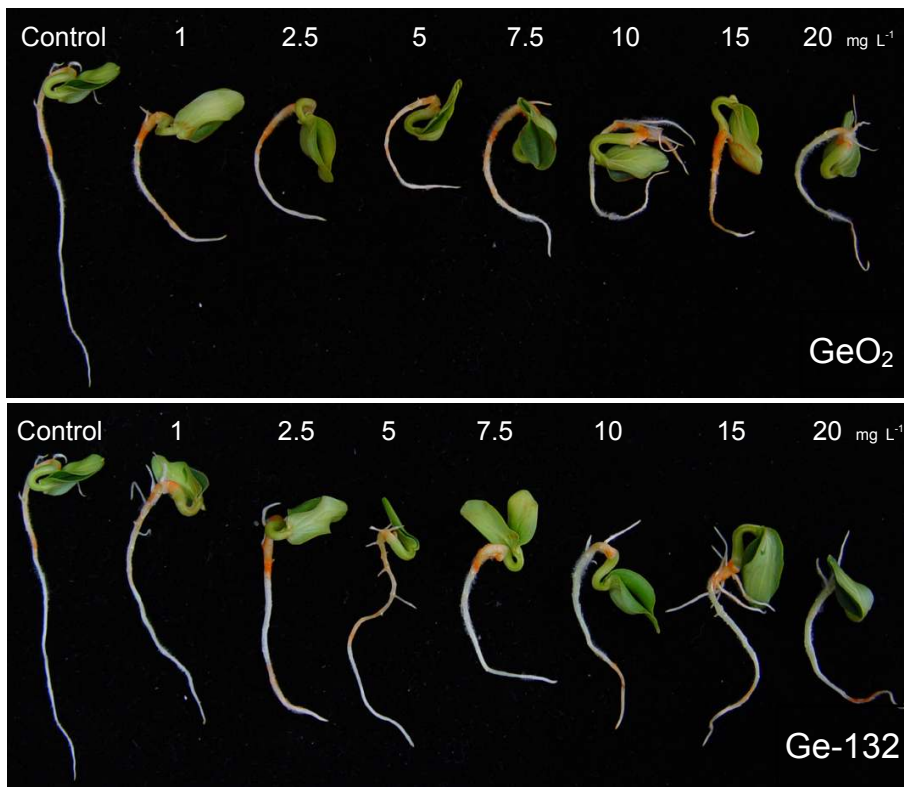


Fig. 3-38. 게르마늄 농도에 따른 발아 4일 후 오이발아종자의 생육상태 비교

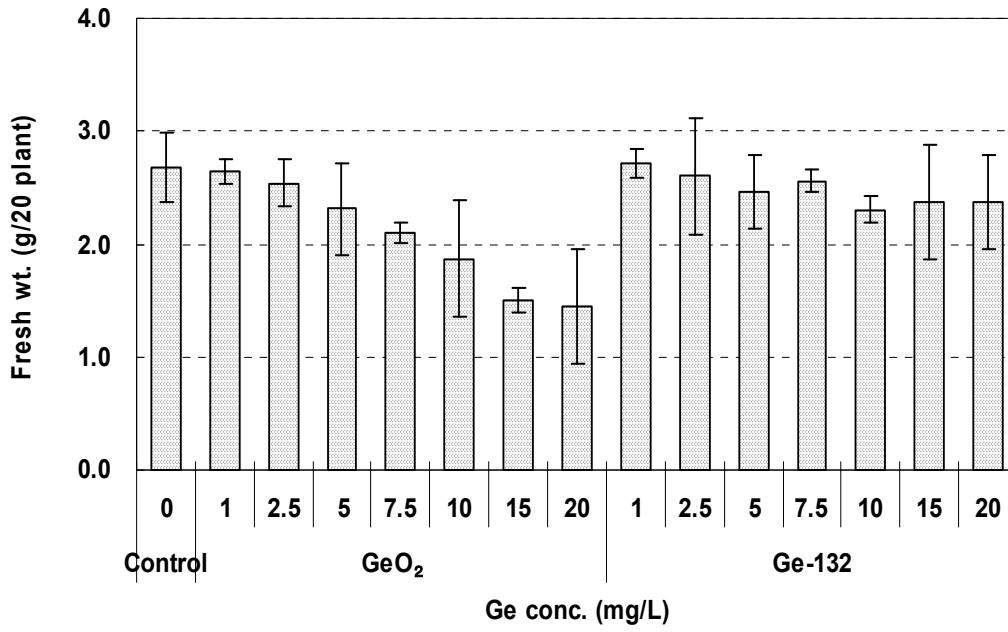


Fig. 3-39. 게르마늄 농도에 따른 오이종자발아 4일 후 생체중

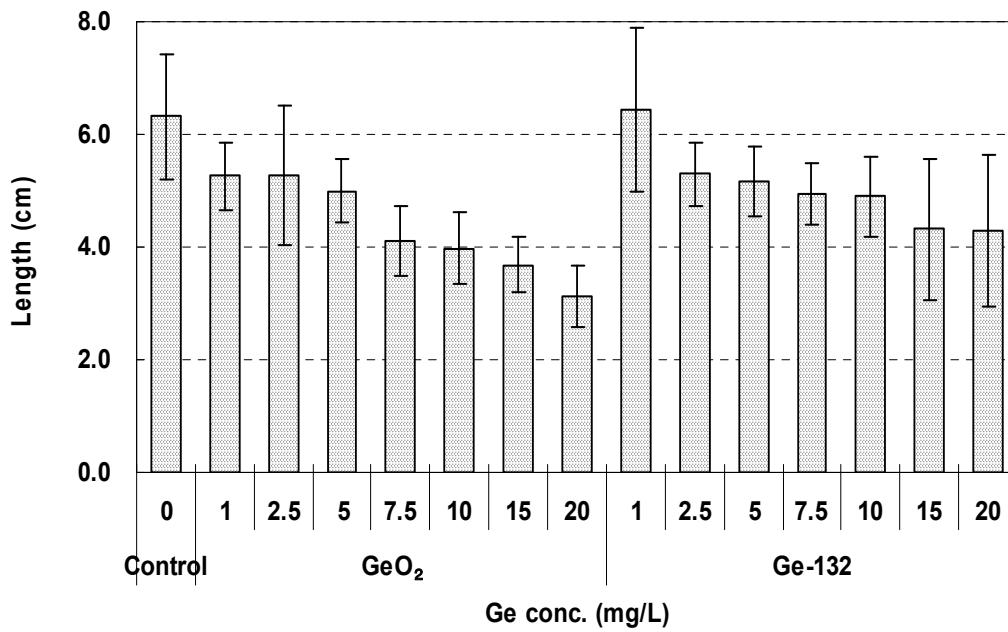


Fig. 3-40. 게르마늄 농도에 따른 오이종자발아 4일 후 초장

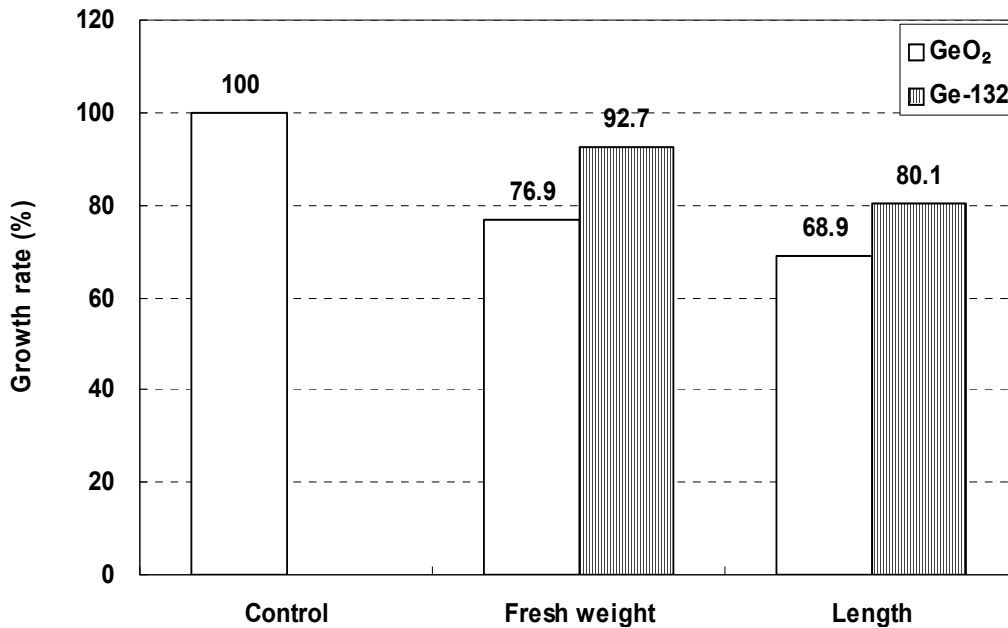


Fig. 3-41. 게르마늄 종류별 오이발아종자의 생체중 및 초장

#### 나. 오이 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 조사

오이 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위 및 최적 게르마늄 처리 농도를 구명하기 위하여 게르마늄 처리 농도별 생육특성, 식물체 내 게르마늄 흡수특성, 양액 내 게르마늄 및 일반성분 함량 변화 등을 조사하였다.

오이 정식은 원형으로 된 유리칼럼 (24×200 mm tube)에 무기게르마늄 (GeO<sub>2</sub>)과 유기게르마늄 (Ge-132) 각각을 농도별 (0, 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 15 및 20 mg L<sup>-1</sup>)로 조정한 1/2배액 양액 100 ml을 각각의 칼럼에 주입하여 파종 10일 된 오이 육묘를 정식하였다. 뿌리 부분의 빛을 차단하기 위하여 칼럼을 알루미늄 호일로 감싼 후 식물성장상 (23 ± 0.5°C)에서 10일간 생육하였다. 생육기간 동안 증산과 증발에 의한 수분 손실량은 2일 간격으로 3차 증류수로 총 양액 부피가 100 ml이 되도록 조정하였다.

생육 조사는 정식 10일 후의 표본식물 5개를 선별하여 길이, 생체중을 조사하였고 지상부 첫 번째 본 잎의 표면적, 전체 뿌리길이, 뿌리직경 및 뿌리 표면적을 조사하였다. 뿌리 염색은 0.05% Trypan blue (lactic acid : glycerol : DW= 1 : 2 : 2)에 침지시켜 실온에서 over night 시킨 후 2-3회 물로 씻어내어 WinRhizo<sup>®</sup> (Regent Instruments Inc. Canada) system을 사용하여 측정하였고, 식물체 및 배양 양액 내 게르마늄과 일반성분은 ICP-MS와 ICP로 분석하였다.

엽록소 함량은 Richardson (2002) 등과 Barnes (1992) 등의 방법에 따라 시료 100 mg에 65°C에서 preheated DMSO (dimethyl sulphoxide)를 4 ml 첨가 한 후 다시 65°C에서 1시간 incubation하여 665nm와 648nm에서 흡광도를 측정하여 chlorophyll -a 및 b 함량을 측정하였다.



### (1) 생육특성

게르마늄 농도에 따른 오이의 생육특성을 조사한 결과, 전체적으로 유기게르마늄 처리에 대해서는 거의 생육저해 현상을 보이지 않았으나 무기게르마늄 처리구에서는 매우 큰 생육저해 현상을 보였다 (Fig. 3-42, 3-43). 무기게르마늄 처리에 의한 생육저해현상은 처리농도  $7.5 \text{ mg L}^{-1}$  이상 처리구에서 2일 후부터 잎에 하얀 반점이 나타나고 잎이 시드는 현상 등의 외형적인 저해현상이 나타났으며 특히 15 및  $20 \text{ mg L}^{-1}$  처리에서는 본 잎 생성이 거의 되지 않았으며 처리 4-5일 이후부터 고사되었다.

지상부 생체중 (Fig. 3-44)은 유기게르마늄 처리구에서는 전체적으로 무처리구와 큰 차이가 없었으며 유기게르마늄 1 및  $2.5 \text{ mg L}^{-1}$  처리구에서는 무처리에 비하여 약간 높거나 거의 비슷한 생체중을 보였다. 무기게르마늄 처리구의 지상부 생체중 (Fig. 3-44)은 무처리구와 유기게르마늄 처리구에 비하여 크게 감소되었으며 그 감소정도는 처리농도가 높을수록 더 크게 나타났다. 이러한 현상은 지하부의 생체중을 조사한 결과 (Fig. 3-45)와 지상부 및 지하부의 식물체 길이를 조사한 결과 (Fig. 3-46, 3-47)에서도 유사하게 나타났다.

그리고 무기게르마늄과 유기게르마늄 처리농도별 지상부 및 지하부의 생체중과 길이 전체의 생육 양상을 무처리구와 비교한 결과 (Fig. 3-48), 생체중의 경우 무기게르마늄 처리에서는 대조구에 비하여 지상부는 약 40%, 지하부는 약 42%가 감소되었으며, 유기게르마늄 처리에서는 각각 약 4% 및 25%가 감소되어 유기게르마늄 처리에서는 지상부에 비하여 지하부의 생체중이 크게 감소되었다. 그리고 전체 길이는 무기게르마늄 처리에서는 지상부가 약 21%, 지하부가 약 11% 감소되었으며, 유기게르마늄 처리구에서는 오히려 대조구에 비하여 지상부, 지하부 모두 식물체 길이가 약간 증가되었다.

그리고 지상부 본 잎의 엽면적과 지하부 뿌리의 전체길이, 표면적, 부피 및 직경을 조사한 결과 (Table 3-11), 본 잎의 엽면적은 유기게르마늄은 모든 처리구에서 대조구에 비하여 약간 높았다. 무기게르마늄 처리에서는 본 잎의 엽면적이 크게 감소되었으며 처리농도가 높을수록 더 크게 감소되는 경향이었으며, 15 및  $20 \text{ mg L}^{-1}$  처리에서는 본 잎 생성이 거의 되지 않았으며 처리 4-5일 이후부터 고사되었다. 그리고 지하부 뿌리의 전체 길이, 표면적 및 부피는 무기게르마늄 및 유기게르마늄 처리구 모두에서 처리농도가 증가할 수록 약간씩 감소되는 경향을 보였으며, 그 감소정도는 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마늄 처리구에서 더 명확하게 나타나 유기게르마늄은 지상부 생육보다는 지하부의 생육을 더 저해하는 것으로 생각되지만 이에 대한 체계적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

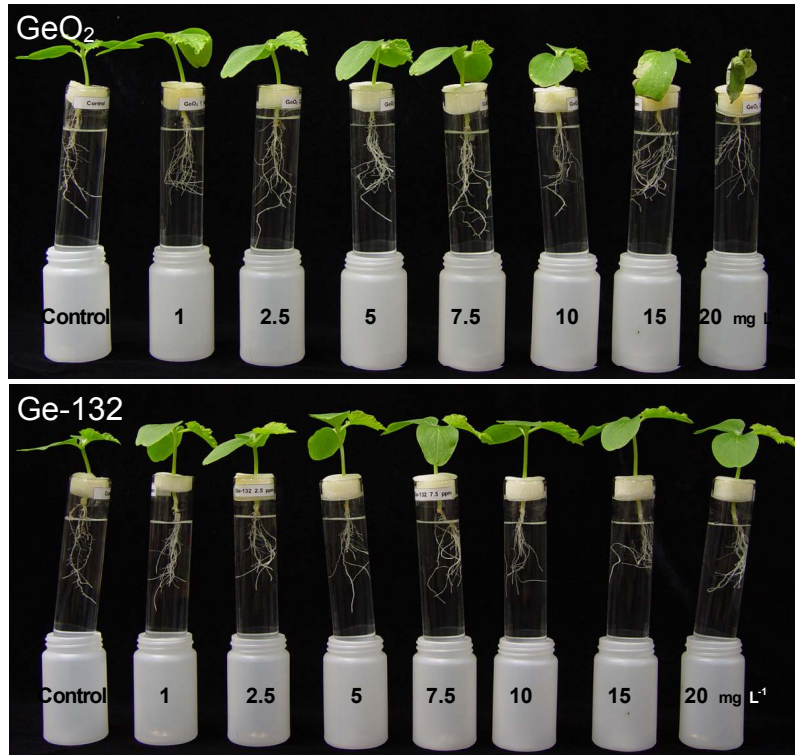


Fig. 3-42. 게르마늄 농도별 처리 10일 후 오이 생육 사진

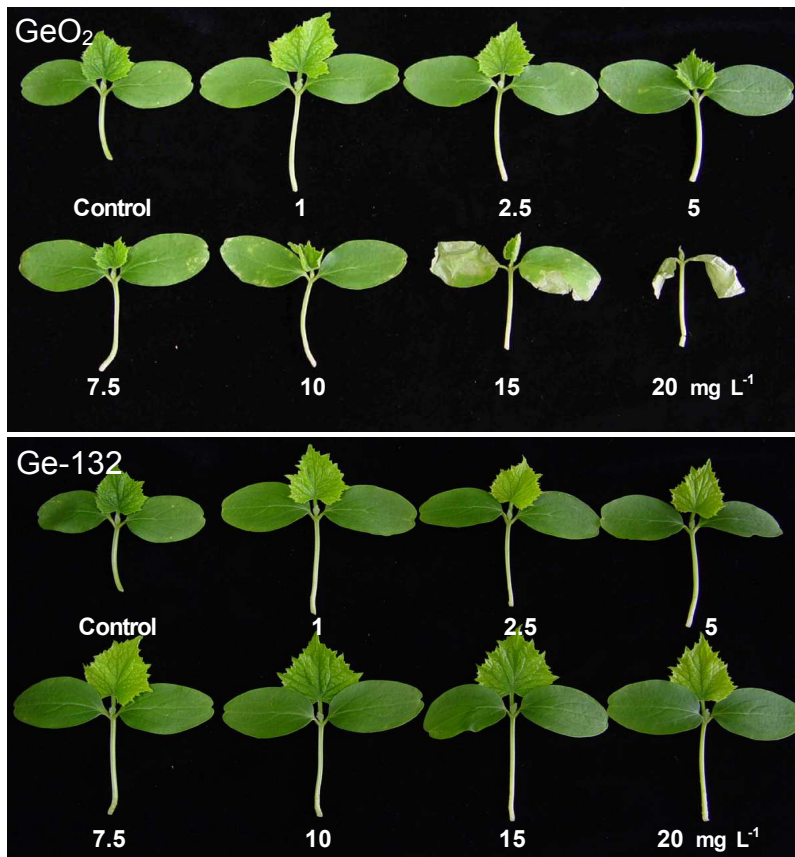


Fig. 3-43. 게르마늄 농도별 처리 10일 후 오이 지상부 생육 사진

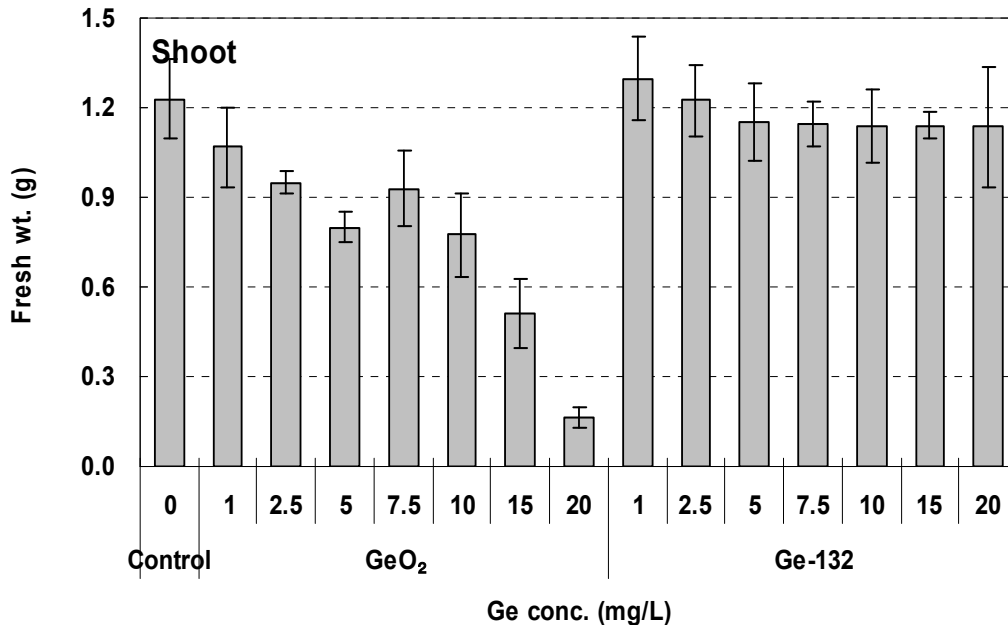


Fig. 3-44. 게르마늄 농도별 처리 10일 후 지상부 생체중

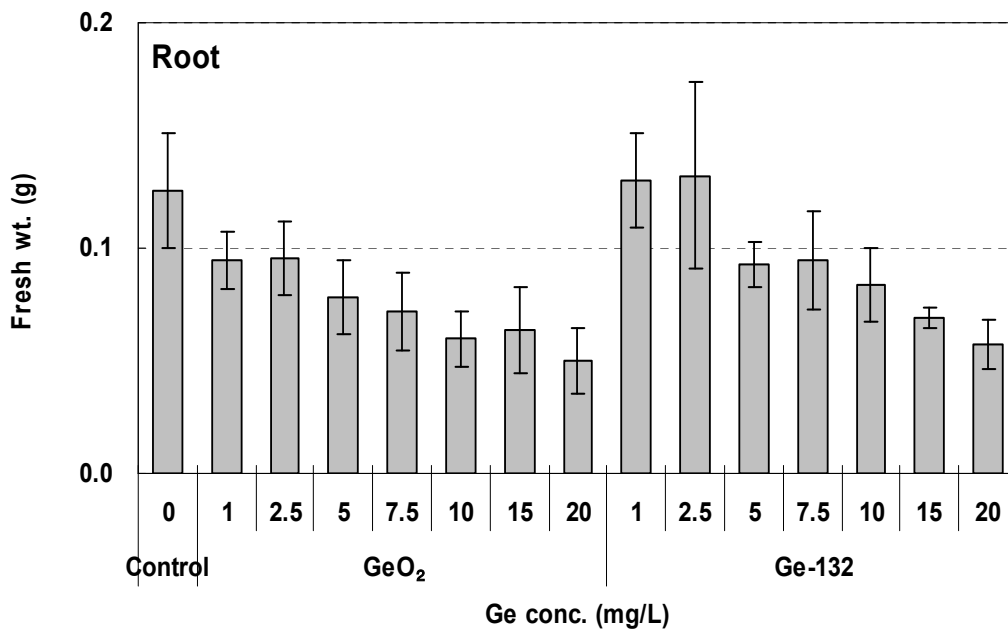


Fig. 3-45. 게르마늄 농도별 처리 10일 후 지하부 생체중

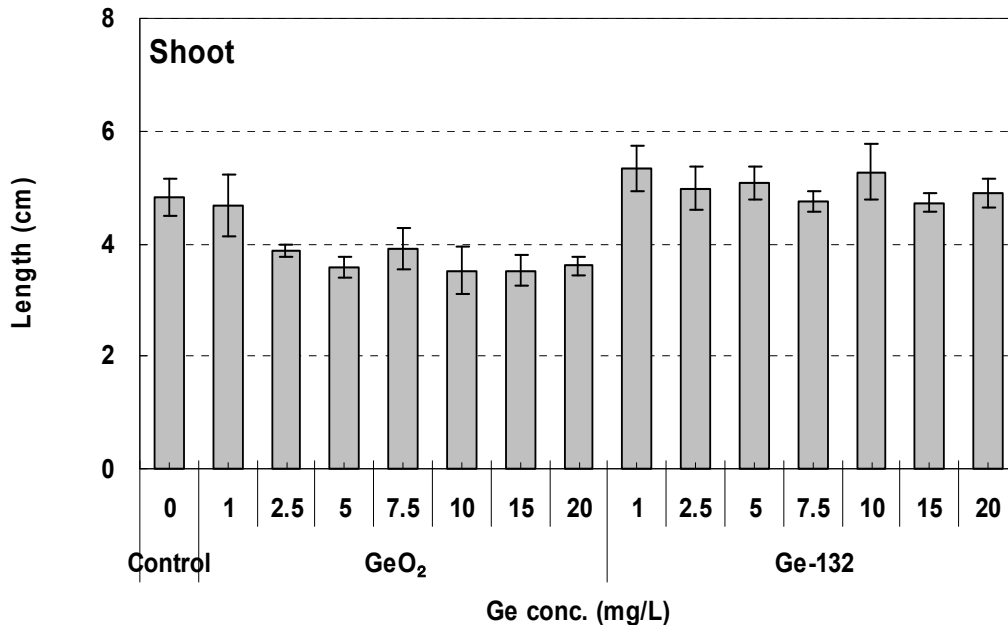


Fig. 3-46. 게르마늄 농도별 처리 10일 후 지상부 길이

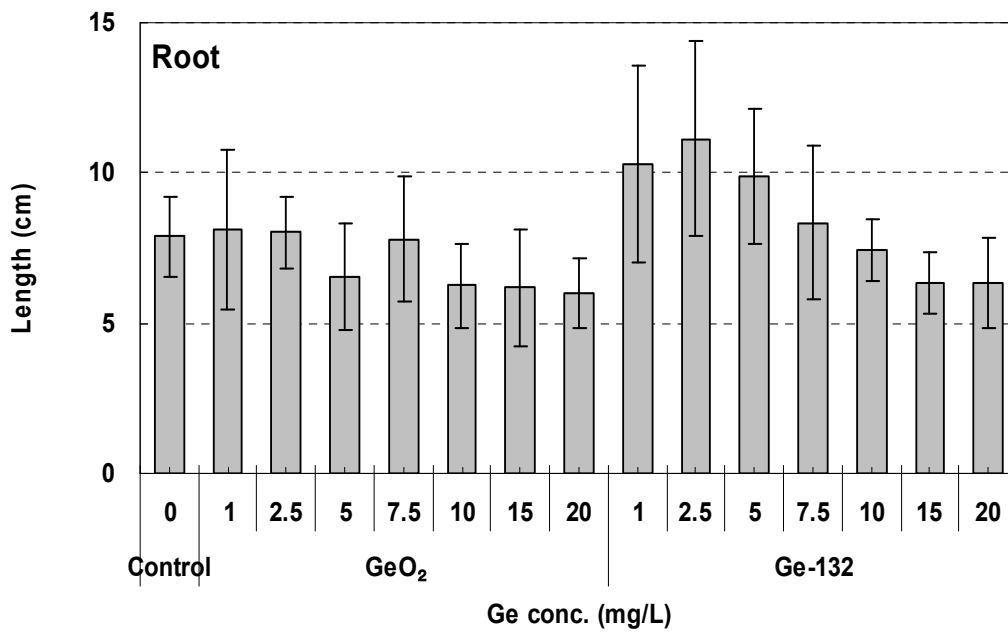


Fig. 3-47. 게르마늄 농도별 처리 10일 후 지하부 길이

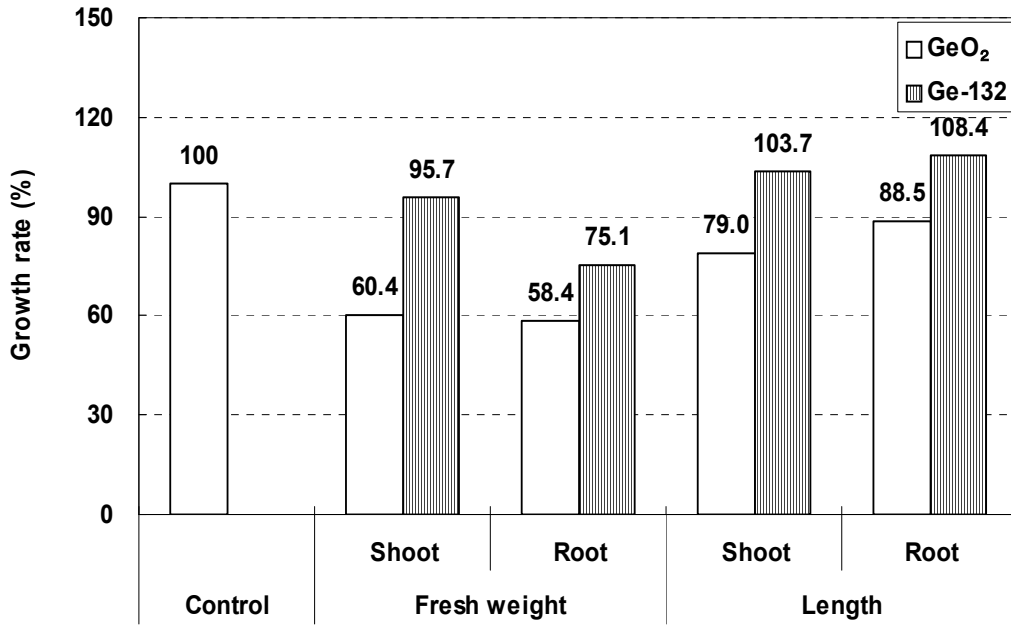


Fig. 3-48. 게르마늄 처리농도별 지상부 및 지하부의 생체중과 길이 전체 생육 양상

Table 3-11. 게르마늄 처리농도별 엽면적과 지하부 뿌리의 전체길이, 표면적, 부피 및 직경

Types of Germanium	Concentration (mg L <sup>-1</sup> )	Leaf		Root			
		Surface area (cm <sup>2</sup> )	Length (cm)	Surface area (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Diameter (mm)	
GeO <sub>2</sub>	Control	0	22.94	88.79	3.52	0.15	0.40
	1	21.75	83.66	3.00	0.12	0.37	
	2.5	21.13	80.64	2.92	0.09	0.36	
	5	17.86	83.39	3.10	0.12	0.39	
	7.5	18.04	89.77	3.41	0.14	0.38	
	10	15.52	84.76	3.08	0.11	0.37	
	15	6.41	79.35	2.91	0.10	0.37	
	20	2.63	81.41	2.90	0.09	0.35	
Ge-132	1	22.53	120.65	4.69	0.14	0.39	
	2.5	25.23	91.52	3.67	0.11	0.40	
	5	24.72	89.26	3.64	0.12	0.41	
	7.5	23.31	80.40	3.23	0.10	0.40	
	10	26.24	81.88	3.16	0.09	0.38	
	15	24.21	92.38	3.42	0.10	0.37	
	20	23.11	87.24	3.11	0.09	0.36	

(2) 엽록소 함량

게르마늄 처리 유무에 따른 식물체내 chlorophyll -a 및 b 함량 변화를 조사한 결과는 Table 3-12에서 보는바와 같이 유기게르마늄의 경우에는 특별한 경향없이 대조구와 유사하였다. 그러나 무기게르마늄 처리에서는 chlorophyll -b 함량은 별 차이가 없었으나 chlorophyll -a 함량은 농도가 높을수록 무치리에 비하여 크게 감소되는 것으로 나타나 무기게르마늄은 식물체의 광합성에 영향을 미치는 것으로 생각되었다.

Table 3-12. 게르마늄 처리농도별 엽록소 함량 변화

Types of Germanium	Conc. (mg L <sup>-1</sup> )	Leaf			Cotyledon		
		Chlorophyll a	Chlorophyll b	Chlorophyll a + b	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Chlorophyll a + b
μg 100mg <sup>-1</sup> Fresh wt.							
Control	0	103.07	12.21	115.28	105.71	14.20	119.92
	1	89.22	13.30	102.51	98.02	14.99	113.01
	2.5	87.20	13.74	100.95	105.00	14.55	119.56
	5	71.56	17.37	88.93	103.76	14.34	118.11
	7.5	70.65	19.47	90.12	100.09	14.23	114.33
	10	65.52	17.89	83.40	98.38	13.98	112.36
	15	64.32	19.86	84.18	102.45	15.27	117.72
	20	47.25	9.05	56.30	98.16	19.87	118.03
GeO <sub>2</sub>	1	85.56	12.36	97.92	109.85	14.35	124.21
	2.5	78.25	23.13	101.39	119.27	12.99	132.26
	5	76.98	19.08	96.07	104.41	14.30	118.71
	7.5	76.11	17.04	93.15	94.65	15.01	109.65
Ge-132	10	103.41	13.69	117.10	110.28	13.04	123.32
	15	91.55	16.82	108.37	100.86	14.40	115.27
	20	101.50	16.88	118.42	101.51	14.36	115.87

(3) 게르마늄 흡수 특성

(가) 식물체 부위별 게르마늄 함량 분포

게르마늄 처리 농도별 처리에 따른 식물체 부위별 건조중량 및 게르마늄 함량을 조사한 결과는 Table 3-13 및 Fig. 3-49에서 보는 바와 같다. 식물체내 전체적인 게르마늄 농도 분포는 유기게르마늄 처리구에 비하여 무기게르마늄 처리구에서 훨씬 높았으며, 무기게르마늄 및 유기게르마늄 처리구 모두에서 처리 농도가 높아질수록 식물체내 게르마늄 흡수도 증가되었다. 식물체 부위별 게르마늄 흡수 농도는 게르마늄 종류에 따라 달랐으며 무기게르마늄 처리구의 경우에는 전반적으로 지하부에 비하여 지상부에 많이 분포되어 있었고, 유기게르마늄의 경우에는

지하부인 뿌리에 훨씬 많이 분포되어 있었다. 식물체 부위별 게르마늄 분포 정도는 무기게르마늄의 경우에는 전체적으로 Stem (43.3%) > Leaf (34.2%) > Root (22.5%) 순으로 뿌리에 비하여 줄기와 잎에 매우 높게 분포되어 있었으며, 유기게르마늄은 Root (89.6%) ≫ Stem (7.7%) > Leaf (2.7%) 순으로 거의 대부분이 뿌리에 분포되어 있었다.

무기게르마늄 및 유기게르마늄 처리구의 각 농도별 식물체내 전체 게르마늄 함량은 무기게르마늄 처리구에서 유기게르마늄 처리구에 비하여 약 2.2배 정도 높았으며, 식물체 부위별 흡수함량은 잎과 줄기에서는 무기게르마늄이 유기게르마늄에 비하여 각각 약 27.0배 및 12.2배 높았고 뿌리에서는 유기게르마늄 처리구에서 무기게르마늄 처리구에 비하여 약 1.9배 높은 것으로 나타났다.

Table 3-13. 게르마늄 처리 농도별 오이 건중량 및 식물체 부위별 게르마늄 함량

Treatment (mg L <sup>-1</sup> )		Dry weight (g)			Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
		Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
Control	0	0.316	0.078	0.036	0.1	0.2	0.2
	1	0.271	0.071	0.030	139.2	177.9	242.5
	2.5	0.236	0.069	0.028	375.5	527.3	500.1
	5	0.220	0.051	0.022	748.4	981.7	753.6
GeO <sub>2</sub>	7.5	0.237	0.061	0.027	886.6	1433.8	1097.3
	10	0.214	0.055	0.019	1458.4	1898.0	1310.0
	15	0.152	0.053	0.023	1851.1	3176.7	1985.2
	20	0.140	0.031	0.014	5996.2	6303.3	1629.3
	1	0.292	0.075	0.034	4.6	11.9	253.2
Ge-132	2.5	0.275	0.068	0.033	22.5	23.4	515.2
	5	0.272	0.066	0.028	26.3	59.4	1000.6
	7.5	0.260	0.070	0.025	41.5	81.5	1487.3
	10	0.264	0.067	0.020	42.5	114.2	2508.7
	15	0.266	0.042	0.011	166.9	607.0	4016.7
	20	0.264	0.068	0.017	120.0	290.5	4136.5

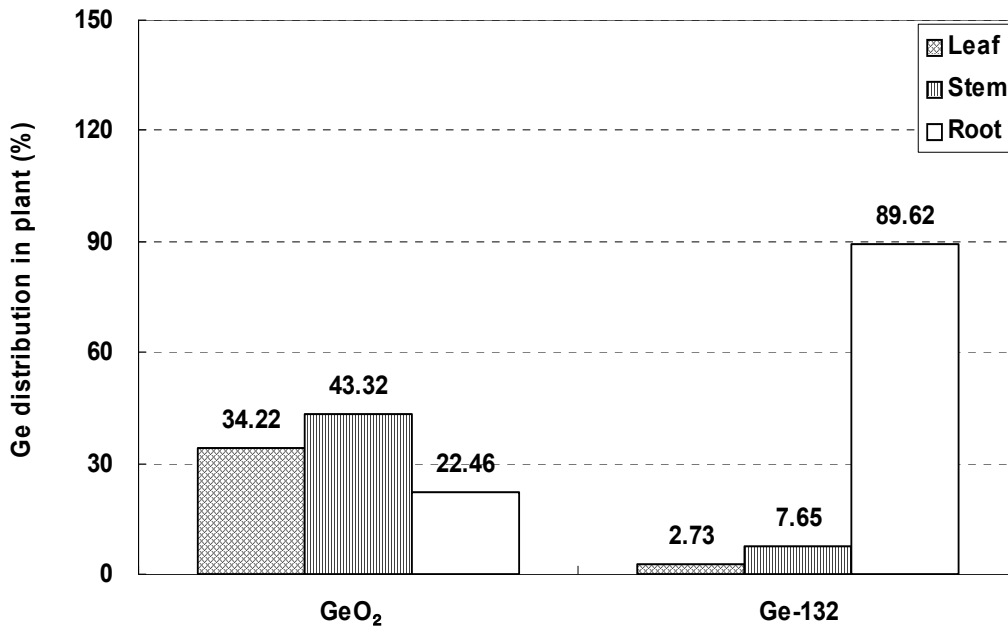


Fig. 3-49. 식물체 부위별 게르마늄 분포

(나) 식물체내 게르마늄 흡수량

식물체 부위별 건조중량과 게르마늄 함량을 이용하여 초기배양액내 투입된 게르마늄 중 식물체내로 흡수된 양을 조사하여 비교 검토한 결과는 Table 3-14에서 보는바와 같다. 초기용액 내 투입된 게르마늄 함량은 각 처리농도별 4개 시험구 (100 ml 처리구<sup>-1</sup>)의 용액 400 ml 내의 게르마늄 함량이며, 식물체내 게르마늄 흡수량은 오이 육묘 정식 10일 후의 식물체 4개의 흡수량을 부위별 총 건조중량으로 환산한 값이다.

초기 용액 내 투입된 게르마늄 중 식물체내로 흡수된 량 (Table 3-14)은 무기게르마늄 처리구의 경우 처리농도 1 mg L<sup>-1</sup> (투입 게르마늄 함량 398 ug)에서는 전체 투입 게르마늄 398 ug중 약 14.4%에 해당하는 약 57.6 ug (잎 37.8 ug, 줄기 12.6 ug, 뿌리 7.2 ug)이 식물체내로 흡수된 것으로 나타났으며, 전체 흡수된 게르마늄의 식물체 부위별 흡수율 분포는 잎 (65.6%) >> 줄기 (21.9%) > 뿌리 (12.5%)로 잎에 흡수된 량이 가장 많았으며 지하부인 뿌리 보다는 거의 대부분이 지상부인 잎과 줄기에 흡수되어 있는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 무기게르마늄 농도별 모든 처리구에서 비슷한 경향을 보였으며, 처리농도가 증가할수록 게르마늄 흡수량도 증가하였지만 흡수율은 일정한 경향을 보였다. 그리고 유기게르마늄 처리구의 경우에는 처리농도 1 mg L<sup>-1</sup> (투입 게르마늄 함량 389 ug)에서는 전체 투입 게르마늄 389 ug중 약 2.8%에 해당하는 약 10.8 ug (잎 1.3 ug, 줄기 0.9 ug, 뿌리 8.5 ug)이 식물체내로 흡수되어 무기게르마늄에 비하여 식물체 흡수효율이 매우 낮은 것으로 나타났다. 전체 흡수된 게르마늄의 식물체 부위별 흡수율 분포는 뿌리 (79.3%) >> 잎 (12.4%) > 줄기 (8.3%)로 무기게르마늄과는 달리 뿌리에 대부분이 흡수되어 있는 것으로 나타나 유기게르마늄은 무기게르마늄에 비하여 식물체 지상부로 이동이 잘 안되는 것으로 보였다. 이러한 경향은 무기게르마늄 처리구



와 마찬가지로 유기게르마늄 농도별 모든 처리구에서 비슷한 경향을 보였으며, 처리농도가 증가할수록 게르마늄 흡수량은 증가하였지만 흡수율은 일정한 경향을 보였다.

Table 3-14. 게르마늄 처리 농도별 오이 식물체 부위별 초기 용액내 Ge (°)에 대한 Ge 흡수량 (°), Ge 흡수율 (°) 관계

Treatment	Ge content( <i>ug</i> ) in	Ge uptake ( <i>ug</i> ) 4 plants <sup>-1</sup>			
	initial solution (100 mL)	Leaf	Stem	Root	Total
GeO <sub>2</sub>	398 (100*)	37.8 <sup>a</sup> (9.49 <sup>b</sup> ) (65.59 <sup>c</sup> )	12.6 (3.17) (21.91)	7.2 (1.81) (12.51)	57.6 (14.47) (100**)
	987 (100*)	88.4 (8.96) (63.85)	36.1 (3.66) (26.08)	14.0 (1.41) (10.07)	138.5 (14.03) (100**)
	1979 (100*)	165.0 (8.34) (71.23)	50.4 (2.54) (21.74)	16.3 (0.82) (7.03)	231.6 (11.70) (100**)
	2998 (100*)	210.0 (7.00) (64.26)	87.0 (2.90) (26.64)	29.7 (0.99) (9.10)	326.7 (10.90) (100**)
	3877 (100*)	312.5 (8.06) (70.73)	105.0 (2.71) (23.76)	24.4 (0.63) (5.52)	441.8 (11.40) (100**)
	5979 (100*)	282.1 (4.72) (56.81)	169.0 (2.83) (34.03)	45.5 (0.76) (9.16)	496.6 (8.31) (100**)
	7996 (100*)	841.9 (10.53) (79.27)	196.7 (2.46) (18.52)	23.5 (0.29) (2.21)	1062.0 (13.28) (100**)
	Ge-132	389 (100*)	1.3 (0.34) (12.4)	0.9 (0.23) (8.26)	8.5 (2.19) (79.34)
1011 (100*)		6.2 (0.61) (27.74)	1.6 (0.16) (6.39)	17.2 (1.70) (68.87)	25.0 (2.47) (100**)
1983 (100*)		7.1 (0.36) (18.28)	3.9 (0.20) (10.01)	28.0 (1.41) (71.71)	39.1 (1.97) (100**)
2977 (100*)		10.8 (0.36) (20.14)	5.7 (0.19) (10.60)	37.2 (1.25) (69.27)	53.7 (1.80) (100**)
3998 (100*)		11.2 (0.28) (16.54)	7.6 (0.19) (11.25)	48.9 (1.22) (72.21)	67.7 (1.69) (100**)
5997 (100*)		44.4 (0.74) (39.55)	25.7 (0.43) (22.87)	42.2 (0.70) (37.57)	112.3 (1.87) (100**)
7988 (100*)		31.7 (0.40) (25.96)	19.6 (0.25) (16.09)	70.7 (0.89) (57.95)	122.1 (1.53) (100**)

(다) 식물체내 게르마늄 흡수율

무기게르마늄 및 유기게르마늄 농도별 처리구의 식물체내 흡수된 게르마늄 총량을 이용하여 식물체 부위별 흡수량과 흡수율을 종합 검토한 결과는 Table 3-15와 Fig. 3-50에서 보는 바와 같다. 초기용액 내 투입된 총 게르마늄 함량은 게르마늄 종류별 전체 처리농도별 전체 시험구 (28개 시험구)의 용액 2,800 ml 내의 게르마늄 함량이며, 식물체내 총 게르마늄 흡수량은 시험구 전체 식물체 28개의 흡수량을 부위별 총 건조중량으로 환산한 값이다.

초기 용액 내 투입된 전체 게르마늄 (무기게르마늄 약 24,214 *ug*, 유기게르마늄 약 24,343

ug)중 식물체내로 흡수된 게르마늄 총량 (Table 3-15)은 무기게르마늄 처리구가 약 11.4%에 해당하는 약 2,754.8 ug이 흡수되었고 유기게르마늄 처리구에서 약 1.8%에 해당하는 약 430.5 ug이 흡수되어 유기게르마늄에 비하여 무기게르마늄의 흡수량이 약 6.4배 정도 높았다. 전체 흡수된 게르마늄의 식물체 부위별 게르마늄 총 흡수량은 무기게르마늄 처리에서는 잎에 약 1,937 ug, 줄기에 약 658 ug, 뿌리에 약 160 ug으로서 잎에 가장 많이 흡수되어 있었으며, 유기게르마늄 처리구에서는 잎에 약 119 ug, 줄기에 약 253 ug, 뿌리에 약 431 ug으로 무기게르마늄과는 달리 뿌리에 가장 많은 양이 흡수되어 있었다.

그리고 전체 투입된 게르마늄에 대한 식물체내에 흡수된 게르마늄의 흡수율 분포 (Fig. 3-50)는 무기게르마늄 처리에서는 초기 게르마늄 투입량의 약 88.6%가 용액 중에 잔류되어 있었고 약 11.4%가 식물체내로 흡수되었으며, 흡수된 게르마늄은 잎에 약 70.2%, 줄기에 약 23.7%, 그리고 뿌리에 약 6.1%가 분포되어 흡수된 게르마늄의 대부분이 지상부로 이동하는 것을 알 수 있었다. 유기게르마늄 처리에서는 초기 게르마늄 투입량의 약 98.2%가 용액 중에 잔류되어 있었고 약 1.8%만이 식물체내로 흡수되어 무기게르마늄에 비하여 식물체내 흡수효율이 매우 낮음을 알 수 있었으며, 흡수된 게르마늄은 잎에 약 0.5%, 줄기에 약 0.3%, 뿌리에 약 1.0%가 분포되어 무기게르마늄 처리구와는 달리 지하부인 뿌리에 많이 분포되어 있었다.

Table 3-15. 초기 용액 내 투입된 전체 게르마늄중 식물체내로 흡수된 게르마늄 총량

Treatment	Ge content ( $\mu\text{g}$ ) / Total solution (2800 mL)	Ge uptake ( $\mu\text{g}$ ) 28 plants <sup>-1</sup>			Total
		Leaf	Stem	Root	
GeO <sub>2</sub>	24214.0 (100*)	1937.6 <sup>a</sup> (8.0 <sup>b</sup> ) (70.2 <sup>c</sup> )	656.7 (2.7) (23.7)	160.5 (0.7) (6.1)	2754.8 (11.4) (100**)
Ge-132	24343.0 (100*)	112.8 (0.5) (27.8)	65.0 (0.3) (16.7)	252.8 (1.0) (55.6)	430.5 (1.8) (100**)

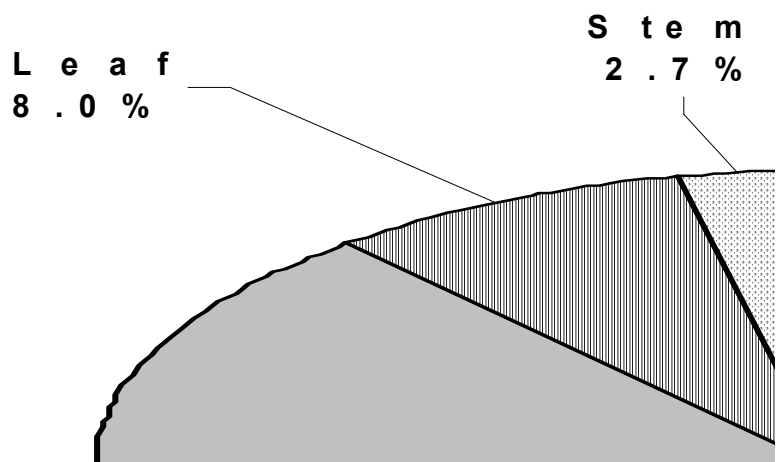


Fig. 3-50. 전체 투입된 게르마늄에 대한 식물체내에 흡수된 게르마늄의 흡수율 분포

(4) 배양액 및 식물체내 무기이온 함량 변화

식물체 생육 전후 배양액 및 식물체내 K, Ca, 및 Mg 함량 변화를 조사한 결과는 Table 3-16 및 3-17에서 보는바와 같다. 식물체 생육전과 생육후의 배양액내 K, Ca, 및 Mg 함량 변화 (Table 3-16)는 전체적으로 무기게르마늄 및 유기게르마늄 처리구 모두에서 무처리에 비하여 배양액내에 남아있는 양이 많았으며, 게르마늄 처리농도가 증가할수록 배양액내 남아있는 양도 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 식물체내 K, Ca, 및 Mg 함량 (Table 3-17)은 전반적으로 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마늄 처리구에서 더 낮았다. 무기게르마늄 처리구의 경우 게르마늄 처리농도에 따른 식물체 부위별 K, Ca, 및 Mg 함량은 앞에서는 K와 Ca 함량은 처리농도가 높아질수록 감소되었으며 Mg 함량은 별 차이가 없었다. 그리고 줄기와 뿌리의 K, Ca, 및 Mg 함량도 게르마늄 처리농도에 따른 큰 차이는 없었다. 그러나 유기게르마늄 처리구에서는 처리농도에 따른 식물체내 K, Ca, Mg 함량은 전반적으로 큰 차이가 있었다. K, Ca, Mg 함량 변화 정도는 식물체 부위에 따라서도 차이가 있었으며, 잎과 줄기의 경우에는 K, Ca, Mg 함량 모두 게르마늄 처리농도가 증가할수록 식물체내 함량은 크게 감소되었으며, 뿌리에서는 K, Ca, Mg 함량 모두 처리농도에 따른 큰 차이 없이 일정한 경향이었다.

Table 3-16. 식물체 생육전과 생육후의 배양액내 K, Ca, 및 Mg 함량 변화

Types of Germanium	Conc. (mg L <sup>-1</sup> )	Contents in initial solution			Contents in solution after growth		
		Mg	K	Ca	Mg	K	Ca
		mg L <sup>-1</sup>					
Control	0	20.7	108.5	59.9	16.0	61.7	49.3
	1	20.3	106.4	58.6	16.6	71.4	51.4
	2.5	21.0	108.1	59.3	17.5	76.2	53.8
	5	20.7	108.4	59.4	20.2	90.5	51.7
	7.5	21.1	109.4	59.7	17.2	78.0	51.5
	10	20.2	105.2	57.4	18.2	82.3	54.8
	15	20.5	107.4	58.3	19.0	89.5	57.1
	20	20.6	108.1	58.5	18.1	86.5	53.3
GeO <sub>2</sub>	1	20.7	108.2	58.3	16.3	64.7	48.2
	2.5	21.1	110.0	59.0	16.0	62.4	46.3
	5	20.8	108.9	58.9	18.3	76.2	53.3
	7.5	20.2	107.0	57.3	18.2	76.7	52.4
	10	20.4	106.8	57.1	17.5	76.4	51.7
	15	20.9	109.4	58.6	19.2	82.1	56.2
	20	20.6	108.8	57.8	17.7	81.0	52.3

Table 3-17. 게르마늄 처리 농도에 따른 오이 식물체내 K, Ca, 및 Mg 함량 변화

Types of Germanium	Conc. (mg L <sup>-1</sup> )	Leaf			Stem			Root		
		Mg	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg	K	Ca
----- g kg <sup>-1</sup> -----										
Control	0	5.4	40.7	12.4	3.7	63.0	8.8	2.4	54.1	4.3
	1	5.5	36.4	11.9	3.4	53.3	7.5	2.3	44.5	4.3
	2.5	5.2	34.3	11.5	5.1	54.3	6.9	2.0	45.8	4.2
	5	4.7	33.1	10.3	4.8	55.3	6.3	2.1	40.8	4.6
	7.5	4.9	30.8	10.9	4.8	54.1	6.6	2.1	40.9	4.3
	10	5.0	32.6	9.9	3.8	54.0	6.2	2.4	42.4	4.6
	15	5.1	29.6	9.4	3.5	58.0	7.8	2.6	40.9	4.5
	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GeO <sub>2</sub>	1	5.4	41.2	10.8	3.5	58.8	8.1	2.4	47.5	4.8
	2.5	5.7	41.2	12.4	3.8	64.8	9.1	2.7	57.3	6.0
	5	5.0	35.0	10.2	2.9	53.3	7.1	2.7	41.7	5.0
	7.5	4.7	37.4	9.4	2.6	49.9	6.0	2.6	49.1	5.1
Ge-132	10	4.9	37.4	8.7	2.6	49.8	6.1	3.4	52.2	4.8
	15	4.2	24.0	4.9	2.3	45.1	5.2	3.0	31.6	6.6
	20	4.3	22.2	4.9	2.7	45.3	5.4	3.0	42.8	4.3

4. 비고형배지경 (소형 담액경)을 이용한 게르마늄 최적처리 방법 구명 및 식물체내 게르마늄 이동 특성 구명

가. 오이재배 및 게르마늄 처리방법

(1) 오이 재배

식물체내 게르마늄 흡수특성 구명을 위한 오이 재배는 비고형배지경 (소액담액경)의 재배상을 스티로폼용기 (L56 × W44 × H15 cm)로 제작하여 담액수경방식으로 본 잎이 2장인 오이 육묘를 30×30 cm간격으로 3주씩 정식 후 재배하였다. 실험에 사용한 양액은 일본원예시험장 표준양액 처방기준에 준하여 표준액의 1/2배액을 사용하였으며, 재배상당 20 L의 양액을 넣고 에어펌프를 통하여 통기시키면서 50일간 배양하였다. 배양기간 동안 증산작용과 증발에 의하여 손실되는 양액은 3일 간격으로 양액을 보충하여 20 L이 유지되도록 하였다. 그리고 과실인 오이는 지상부를 bottom stage, middle stage, top stage로 구분하여 각 stage당 1개씩의 과실만 남기고 나머지는 제거하여 재배하였다.

(2) 게르마늄 처리방법

식물체 게르마늄 처리는 무기게르마늄 (GeO<sub>2</sub>)과 유기게르마늄 (Ge-132) 모두 10 mg L<sup>-1</sup> 농

도로 처리하였으며, 처리방법은 ① 양액 내 관주처리, ② 엽면처리, ③ 양액 내 관주처리+엽면 처리의 3가지 방법으로 하였다. 양액 내 관주처리는 오이 정식 15일 후에 양액 내에 게르마늄 농도가  $10 \text{ mg L}^{-1}$ 이 되도록 첨가하였고, 엽면처리는 정식 15일 이후부터 게르마늄 농도가  $10 \text{ mg L}^{-1}$ 인 용액 (0.2%-Tween 80)을 1주에 4회씩 총 20회 스프레이로 엽면 살포 하였으며, 이때 1회당 살포량은 오이 3주당 100 ml을 균일하게 살포하였다. 그리고 양액내 관주처리+엽면 처리는 오이 정식 15일 후에 양액 내에 게르마늄 농도가  $5 \text{ mg L}^{-1}$ 이 되도록 첨가하고 동시에 게르마늄 농도가  $5 \text{ mg L}^{-1}$ 인 용액 (0.2%-Tween 80)을 1주에 4회씩 총 20회 스프레이로 엽면 살포 하였으며 1회당 살포량은 오이 3주당 100 ml을 균일하게 살포하였다. 오이 재배 기간동안 처리방법별 총 투입된 게르마늄 함량은 양액 내 관주처리는 약 200 mg, 엽면처리는 약 20 mg, 양액 내 관주처리+엽면처리는 약 110 mg이었다.

### (3) 식물체내 게르마늄 이동 특성 구명을 위한 시료 분류 방법

식물체내 게르마늄 분포 특성과 이동특성을 구명하기 위하여 Fig. 3-51에서 보는 바와 같이 식물체 부위별로 세분화하여 각 부위별 게르마늄 분포특성을 비교 검토하였다. 오이 식물체는 지하부인 root과 지상부로 구분하고 지상부는 bottom stage, middle stage, top stage의 3등분으로 구분하여 각 stage별로 fruit, leaf, petiole, stem 으로 각각 구분하였다 (Fig. 3-51 A). 그리고 지상부 아래쪽인 bottom stage 과실인 오이의 꼭지 부분 (stalk), 과실을 부위별로 3등분하여 꼭지 부분을 기준으로 꼭지 옆 부분 (part I), 중간 부분 (part II), 윗 부분 (part III)으로 구분 (Fig. 3-51 B)하고, 또한 과실을 껍질 (rind), 과육 (pulp), 오이 속 (seeds) 부분으로 구분 (Fig. 3-51 C)하여 과실 부위별 게르마늄 함량 분포 특성을 비교 검토 하였다.

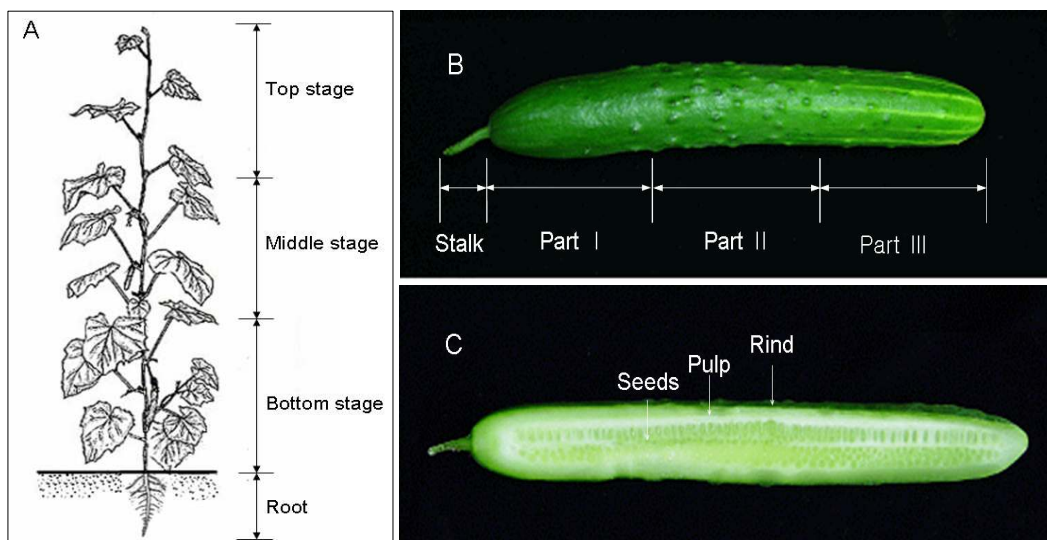


Fig. 3-51. 식물체내 게르마늄 이동 특성 구명을 위한 시료 분류 방법

## 나. 게르마늄 최적 처리방법 구명

### (1) 게르마늄 처리방법별 지상부 및 지하부 생육 특성

게르마늄 처리방법에 따른 오이의 지상부 및 지하부의 생육특성을 조사한 결과는 Fig. 3-52, 3-53, 3-54, 3-55 Fig. 2-16, 17, 18, 19에서 보는 바와 같다. 게르마늄 처리방법별 지상부 및 지하부 생육 특성은 무기게르마늄의 경우 처리방법에 따라 성장반응 차이가 매우 크게 나타났으나 유기게르마늄 처리에서는 처리방법에 따른 큰 차이가 없었다. 무기게르마늄 처리구에서는 엽면처리의 경우에는 전체적으로 생육저해현상이 크게 나타나지 않았으며 오히려 뿌리의 생체중은 대조구에 비하여 약 13% 더 증가하였다. 그러나 양액 내 관주처리와 양액 내 관주처리+엽면처리에서는 지상부 및 지하부의 생육이 크게 저해되었으며 지상부 및 지하부의 길이는 대조구에 비하여 양액 내 관주처리에서는 각각 약 54 및 47%, 관주처리+엽면처리에서는 각각 약 51% 및 45% 감소되었고, 지상부 및 지하부의 생체중도 양액 내 관주처리에서 각각 약 83% 및 81%, 관주처리+엽면처리에서는 각각 약 71% 및 76% 감소되어 관주처리+엽면처리에 비하여 양액 내 관주처리에 의해서 생육저해 현상이 약간 더 높은 것으로 나타났다.

그리고 유기게르마늄 처리구의 경우에는 전체적으로 무기게르마늄 처리구와는 달리 처리방법에 따른 생육 저해현상이 거의 나타나지 않았으며, 지상부 길이는 모든 처리구에서 대조구에 비하여 약 15-21% 정도 증가된 것으로 나타났으며 생체중은 약간 감소되었다. 지하부인 뿌리는 엽면처리와 양액 내 관주처리+엽면처리에서 대조구에 비하여 길이는 약 9% 및 21%, 뿌리 생체중은 각각 약 16% 및 4% 정도 증가되었다.

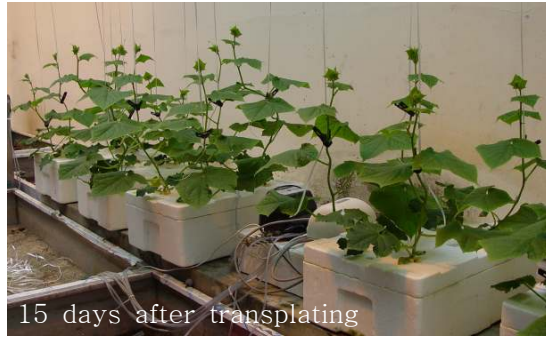


Fig. 3-52. 게르마늄 처리방법별 오이 생육 사진

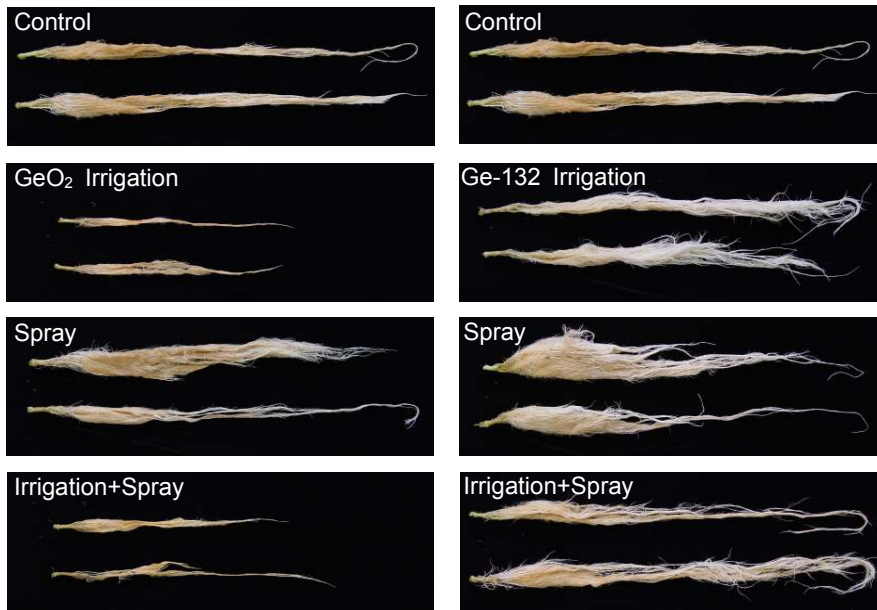


Fig. 3-53. 게르마늄 처리방법별 생육 50일 후 뿌리 성장 비교



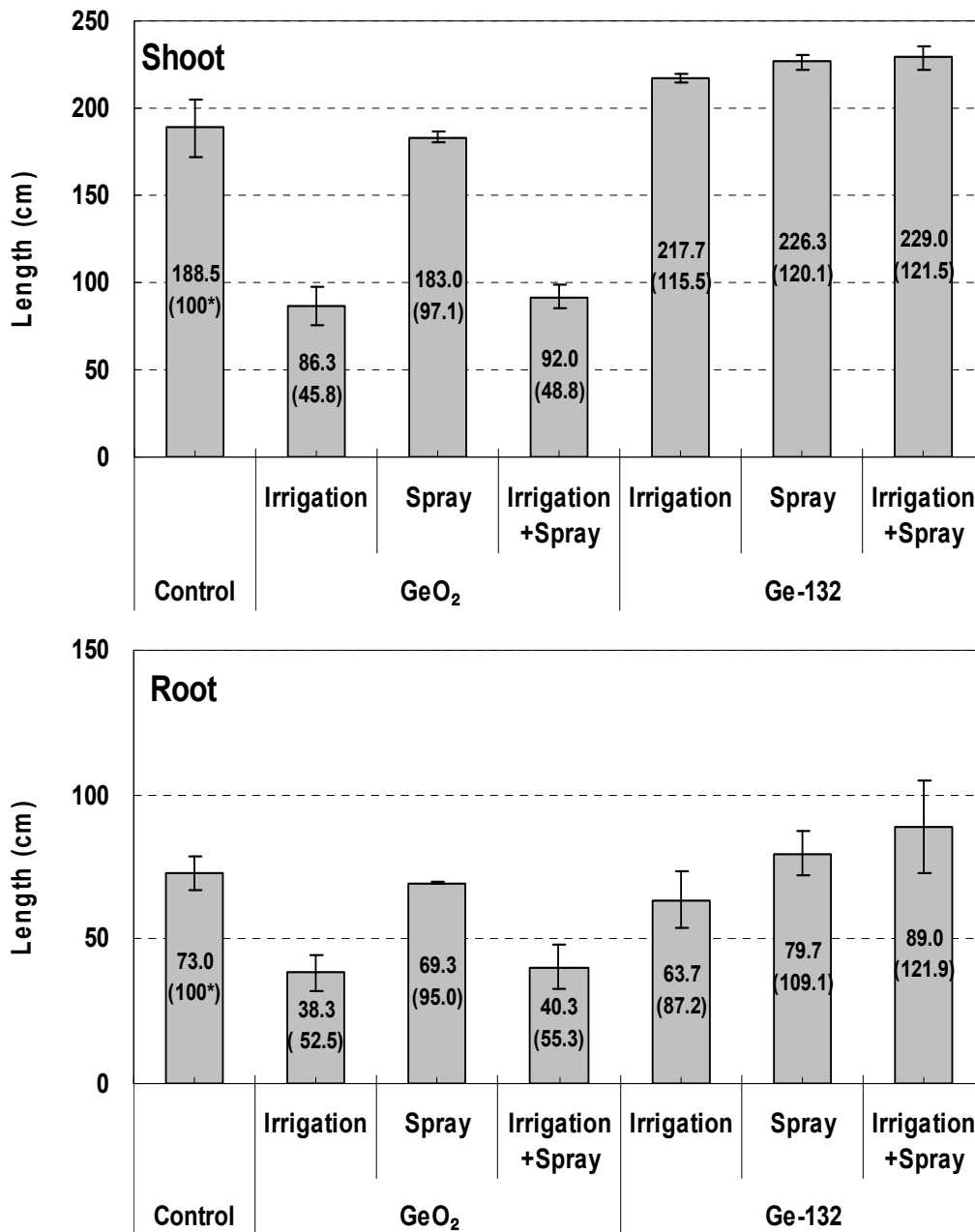


Fig. 3-54. 게르마늄 처리방법에 따른 오이의 지상부 및 지하부의 길이 변화

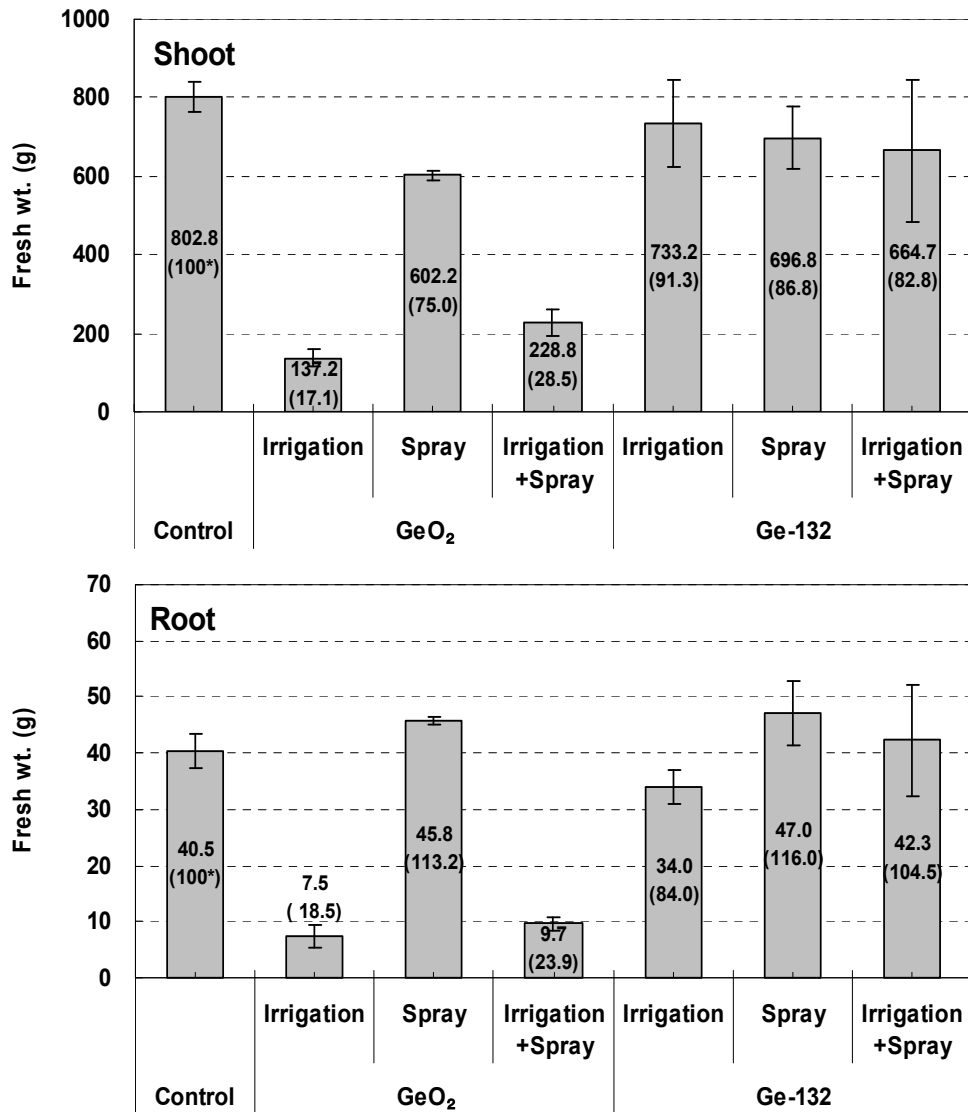


Fig. 3-55. 게르마늄 처리방법에 따른 오이의 지상부 및 지하부의 생체중 변화

## (2) 게르마늄 처리방법별 과실 (오이) 성장 특성

게르마늄 처리방법에 따른 과실 (오이) 형성 특성을 조사하기 위하여 Fig. 3-51(A)와 같이 식물체 지상부를 bottom stage, middle stage, top stage의 3등분으로 구분하여 각 stage에 1개 씩의 과실 (오이)를 착생시켜 생육한 과실의 형성 특성을 조사한 결과는 Fig. 3-56 및 Table 3-18에서 보는 바와 같다.

Fig. 3-56은 게르마늄 처리방법별 생육 50일 후의 bottom stage에 형성된 평균적인 과실의 외형적인 형태를 비교한 사진으로서 무기게르마늄 처리구에서는 관주처리와 관주+엽면처리에서 과실형성에 저해를 크게 받은 것을 알 수 있으며, 유기게르마늄 처리구에서는 처리방법에 따른 큰 저해현상은 없는 것을 알 수 있었다.

게르마늄 처리방법에 따른 식물체 stage별 과실의 생육 특성을 조사한 결과는 Table 3-18에서 보는바와 같이 전체적으로 무기게르마늄 처리구의 경우 엽면처리에서는 큰 차이 없이 대조구와 유사한 생육 특성을 보였으나 관주처리와 관주+엽면처리에서는 과실의 길이, 중량, 둘레

가 크게 감소되었다. 무기게르마늄 처리구의 게르마늄 처리방법별 bottom stage의 과실의 길이는 대조구에 비하여 각각 약 62% 및 45% 감소하였고, 과실 생중량은 각각 약 87% 및 79%, 과실 둘레는 각각 약 39% 및 34%가 감소되어 게르마늄 처리방법별 전체적인 과실의 성장 감소정도는 관주처리 > 관주+엽면처리 ≫ 엽면처리 순이었다. 그리고 유기게르마늄 처리구의 경우에는 3가지 처리방법 모두에서 과실의 길이, 중량, 둘레 등이 대조구와 비슷하거나 약간 증가되는 경향이였다.

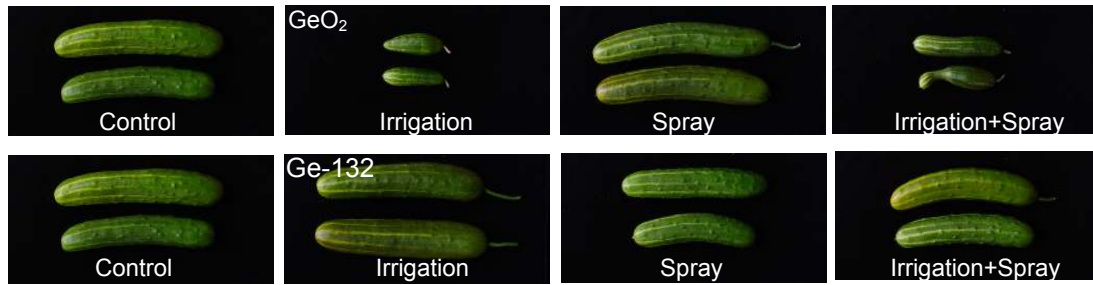


Fig. 3-56. 게르마늄 처리방법별 생육 50일 후의 bottom stage에 형성된 평균적인 과실의 외형적인 형태

Table 3-18. 게르마늄 처리방법에 따른 식물체 stage별 과실의 생육 특성

Site	Control	Irrigation		Spray		Irrigation+Spray		
		GeO <sub>2</sub>	Ge-132	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	
Top stage	Length (cm)	5.27 (100*)	-	7.81 (148.29)	6.07 (115.19)	7.9 (150.00)	4.13 (78.48)	7.07 (134.18)
	Weight (g)	3.00 (100*)	-	4.82 (160.67)	3.67 (122.22)	3.98 (132.67)	0.83 (27.78)	5.33 (177.78)
	Girth (cm)	2.60 (100*)	-	3.78 (145.38)	2.87 (110.26)	2.34 (90.00)	0.50 (19.23)	3.10 (119.23)
Middle stage	Length (cm)	23.80 (100*)	-	22.00 (92.44)	4.93 (20.73)	28.60 (120.17)	16.17 (67.93)	22.40 (94.12)
	Weight (g)	195.50 (100*)	-	64.50 (32.99)	1.67 (0.85)	310.50 (158.82)	55.47 (28.37)	136.5 (69.82)
	Girth (cm)	10.80 (100*)	-	7.60 (70.37)	1.67 (15.43)	13.05 (120.83)	6.77 (62.65)	9.70 (89.81)
Bottom stage	Length (cm)	27.10 (100*)	10.27 (37.88)	28.73 (106.03)	26.53 (97.91)	28.20 (104.06)	15.00 (55.35)	26.47 (97.66)
	Weight (g)	310.50 (100*)	40.67 (13.10)	424.67 (136.77)	300.33 (96.73)	323.94 (104.33)	64.83 (20.88)	315.50 (101.61)
	Girth (cm)	13.60 (100*)	8.33 (61.27)	16.03 (117.89)	13.30 (97.79)	14.01 (91.54)	9.00 (66.18)	13.93 (102.45)

( ) : Index

#### 다. 식물체내 게르마늄 분포 및 이동특성 구명

무기게르마늄 ( $\text{GeO}_2$ )과 유기게르마늄 ( $\text{Ge-132}$ )을 ① 양액내 처리, ② 엽면처리, ③ 양액내처리+엽면처리의 3가지 방법으로 하여 정식 50일 후의 식물체를 Fig. 3-51과 같이 식물체 부위별로 세분화하여 각 부위별 게르마늄 분포특성을 조사하여 식물체내 게르마늄 분포와 이동특성을 비교 검토하였다. 오이 식물체는 지하부인 root와 지상부로 구분하고 지상부는 bottom stage, middle stage, top stage의 3등분으로 구분하여 각 stage별로 fruit, leaf, petiole, stem으로 각각 구분하였다 (Fig. 3-51 A), 그리고 지상부 아래쪽인 bottom stage의 과실인 오이를 꼭지 부분 (stalk), 과실을 부위별로 3등분하여 꼭지 부분을 기준으로 꼭지 옆 부분 (part I), 중간 부분 (part II), 윗 부분 (part III)으로 구분 (Fig. 3-51 B)하고, 또한 과실을 껍질 (rind), 과육 (pulp), 오이 속 (seeds) 부분으로 구분 (Fig. 3-51 C)하여 과실 부위별 게르마늄 함량 분포특성을 비교 검토 하였다. 오이 재배 기간동안 처리방법별 총 투입된 게르마늄 함량은 양액내 처리는 약 200 mg, 엽면처리는 약 20 mg, 양액내 관주처리+엽면처리는 약 110 mg이다.

##### (1) 처리방법별 식물체내 게르마늄 함량 분포

게르마늄 처리방법에 따른 식물체 부위별 게르마늄 함량 (농도)을 조사한 결과는 Table 3-19 및 Fig. 3-57, 3-58, 3-59에서 보는 바와 같다. 식물체내 게르마늄 흡수정도 (Table 3-19)는 게르마늄 처리방법에 따라 큰 차이가 났으며, 게르마늄 종류에 따라서도 차이가 있었다. 처리방법별 게르마늄 흡수 농도 분포는 전체적으로 식물체 부위별로도 큰 차이가 있었으며 흡수 농도 분포정도는 유기게르마늄 처리구에 비하여 무기게르마늄 처리구에서 훨씬 높았다.

게르마늄 처리방법에 따른 식물체 지상부와 지하부의 게르마늄 흡수농도분포 (3-57)는 처리방법에 따라 큰 차이가 있었으며, 게르마늄 종류에 따라서도 차이가 있었다. 양액내 관주처리의 경우 무기게르마늄의 경우에는 흡수된 게르마늄의 약 94%가 지상부인 과실, 줄기 잎 등에 분포되어 있었고 지하부인 뿌리에는 약 5.9%만이 존재하였다. 유기게르마늄의 경우에는 무게르마늄과는 반대로 97%가 지하부인 뿌리에 존재하였고 2.7%만이 지상부인 과실, 줄기, 잎 등에 분포하였다. 엽면처리에서는 무기게르마늄의 경우 지상부에 약 61%, 지하부인 뿌리에 약 39%로서 지상부인 잎, 줄기 등에 존재하는 비율이 낮아지고 지하부인 뿌리에 존재하는 비율이 높아졌다. 유기게르마늄의 경우에는 지상부에 약 62%, 지하부에 약 38%로서 양액내 처리에 비하여 지상부에 존재하는 비율이 훨씬 높았다. 그리고 관주처리와 엽면처리를 동시에 하였을 경우에는 양액내 관주처리에서와 거의 유사한 경향을 나타내었으며, 무게르마늄처리의 경우 지하부인 뿌리에 존재하는 비율이 약간 높아졌으나 유기게르마늄 처리구에서는 별 차이가 없었다.

식물체 지상부의 전체 길이를 bottom stage, middle stage, top stage로 3등분하여 각 stage별로 분포되어 있는 게르마늄 함량을 조사한 결과 (Fig. 3-58), 관주처리의 경우 무기게르마늄과 유기게르마늄 모두 top stage > middle stage > bottom stage 순으로 분포되어 있었으며, 엽면처리의 경우에는 무기 및 유기게르마늄 모두 middle stage > bottom stage > top stage

순으로서 양액내 관주처리와는 다른 분포양상을 보였다. 그리고 관주처리+엽면처리의 경우에는 관주처리와 엽면처리와는 달리 stage별 분포 차이가 커지 않았다.

지상부 각 stage를 과실 (fruit), 잎 (leaf), 잎줄기 (petiole), 줄기 (stem)로 구분하여 각 부위별 게르마늄 흡수 분포농도를 조사한 결과는 Fig. 3-59에서 보는 바와 같이 양액내 관주처리의 경우 무기게르마늄처리에서는 잎줄기 (36.4%) > 잎 (33.1%) > 줄기 (28.5%) ≫ 과실 (2.1%) 순으로서 과실인 오이에는 분포함량이 매우 낮았으며, 유기게르마늄 처리에서는 잎줄기 (37.1%) > 잎 (27.7%) > 잎 (18.0%) ≥ 과실 (17.2%)로 무기게르마늄에 비해 유기게르마늄 처리에서 과실내 분포함량이 높았다. 엽면처리에서는 관주처리와 관주+엽면처리에 비하여 무기 및 유기게르마늄 처리구 모두 잎에 분포되어 있는 함량이 월등히 높았다. 관주+엽면처리에서는 무기게르마늄의 경우 관주처리에 비하여 과실내 게르마늄 분포함량이 증가되었으며, 무기 및 유기게르마늄 처리구 모두 잎의 게르마늄 분포함량이 크게 감소하고 엽면처리에 비하여 줄기내 게르마늄 함량분포가 크게 증가되었다.

Table 3-19. 게르마늄 처리방법에 따른 식물체 부위별 게르마늄 함량

Site		Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )							
		Control	Irrigation		Spray		Irrigation+Spray		
			GeO <sub>2</sub>	Ge-132	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	
Shoot	Fruit	0.05	-	69.92	9.14	21.37	1345.45	47.29	
	Top stage	Leaf	0.01	4922.93	62.16	12.21	13.73	1302.75	30.09
		Petiole	0.10	3376.89	135.35	14.42	8.90	1505.61	67.02
		Stem	0.05	3069.95	101.53	15.02	11.85	1125.46	60.06
	Middle stage	Fruit	0.00	-	52.20	19.92	13.61	294.16	31.43
		Leaf	0.02	2753.30	58.67	53.25	36.72	1222.24	54.91
		Petiole	0.02	4112.41	117.72	15.40	12.54	1721.72	74.02
		Stem	0.03	2970.18	90.96	13.33	10.15	1379.57	51.52
	Bottom stage	Fruit	0.00	219.90	46.27	8.67	14.71	275.20	30.29
		Leaf	0.04	2891.37	54.48	50.30	31.94	1052.45	49.01
		Petiole	0.03	4125.26	108.97	21.08	7.02	1734.64	57.37
		Stem	0.03	3059.28	78.31	12.91	11.20	1538.97	38.55
Root		0.02	198.64	2910.37	12.98	9.99	173.83	1362.50	

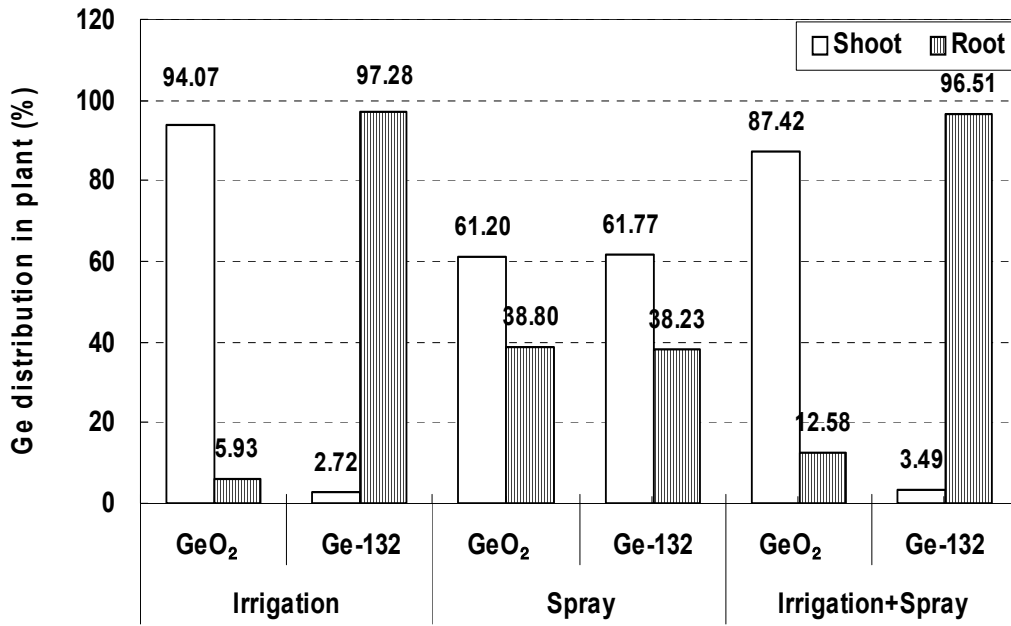


Fig. 3-57. 게르마늄 처리방법에 따른 지하부 및 지상부 게르마늄 함량

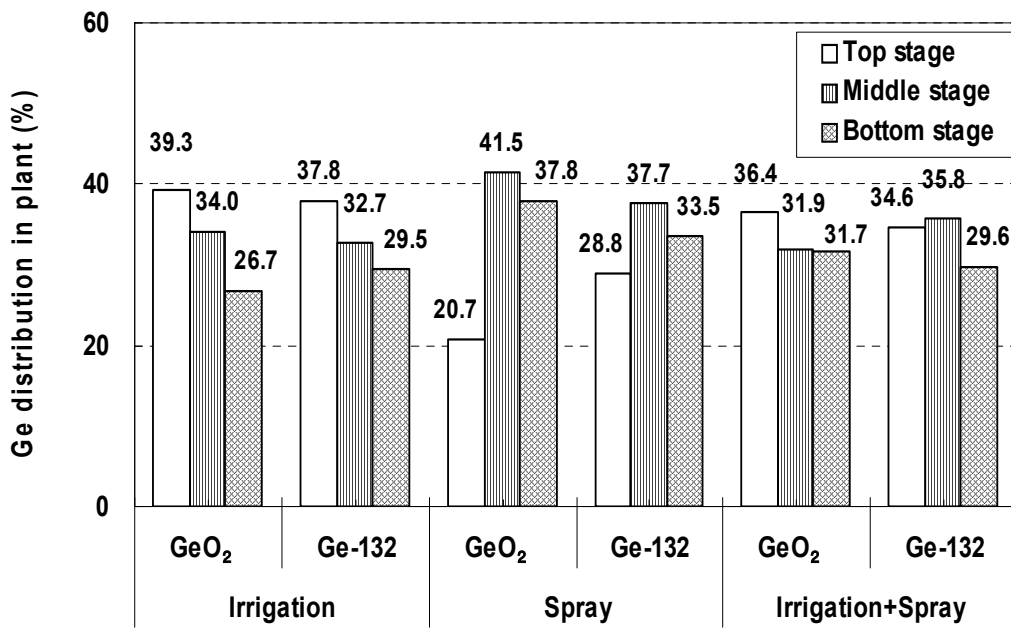


Fig. 3-58. 게르마늄 처리방법에 따른 지상부 stage 단계별 게르마늄 함량

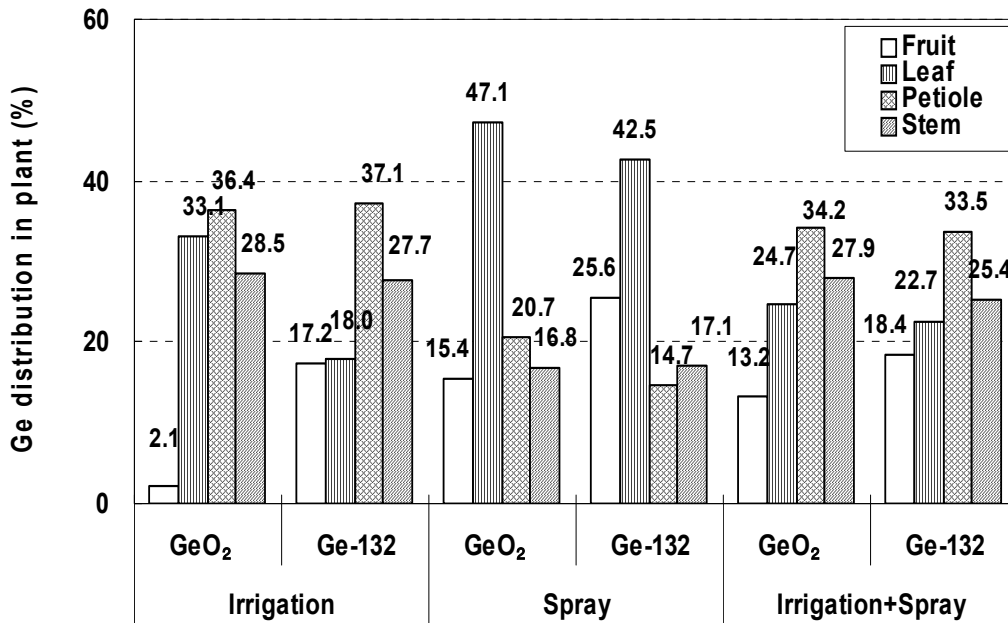


Fig. 3-59. 게르마늄 처리방법에 따른 지상부 부위별 게르마늄 함량

#### (2) 처리방법별 식물체내 게르마늄 흡수량

게르마늄 처리방법에 따른 식물체 부위별 건조중량과 게르마늄 함량 (Table 3-20)을 이용하여 게르마늄 처리용액내 투입된 전체 게르마늄 함량중 식물체내로 흡수된 양을 조사하여 비교 검토한 결과는 Table 3-21에서 보는바와 같다. 오이 재배 기간 동안 처리방법별 총 투입된 게르마늄 함량은 양액 내 처리는 약 200 mg, 엽면처리는 약 20 mg, 양액 내 처리+엽면처리는 약 110 mg이다. 식물체내 게르마늄 흡수량은 오이 육묘 정식 50일 후의 식물체 3개의 흡수량을 부위별 총 건조중량으로 환산하였다.

게르마늄 처리 방법별 초기 용액 내 투입된 게르마늄 중 식물체내로 흡수된 총량은 게르마늄 투입량이 높을수록 식물체내로 흡수되는 양도 증가되었으며, 무기게르마늄 처리구의 경우 양액 내 관주처리 (투입 게르마늄 함량 200 mg)에서는 전체 투입 게르마늄 200 mg중 약 27.3%에 해당하는 약 54.5 mg이 식물체내로 흡수된 것으로 나타났으며, 유기게르마늄 처리구에서는 약 13.5%에 해당하는 약 27 mg이 식물체내로 흡수된 것으로 나타났다. 엽면처리구 (투입 게르마늄 함량 20 mg)에서는 무기게르마늄의 경우 전체 투입게르마늄 20 mg중 약 18%에 해당하는 약 3.6 mg이 식물체내로 흡수되었고, 유기게르마늄 처리구에서는 약 16.7%에 해당하는 약 3.33 mg이 식물체내로 흡수되어 유기게르마늄의 경우 관주처리에 비하여 엽면처리에서 식물체 흡수효율이 약간 더 증가한 것으로 나타났다. 그리고 관주+엽면처리 (투입 게르마늄 함량 110 mg)에서는 무기게르마늄의 경우 전체 투입된 게르마늄의 약 18%에 해당하는 약 40.9 mg이 식물체내로 흡수되었고 유기게르마늄처리구의 경우 약 16.4%에 해당하는 약 16.24 mg이 식물체내로 흡수된 것으로 나타났다. 따라서 게르마늄 처리방법에 따른 식물체내에 흡수되는

게르마늄 총 함량은 무기게르마늄의 경우에는 관주처리에서 가장 많은 양을 흡수하였으며 엽면처리에서는 흡수량이 감소되었다. 유기게르마늄의 경우에는 관주처리 보다는 엽면처리에서 흡수량이 약간 더 증가되는 것으로 나타났다.

식물체내에 흡수된 전체 게르마늄의 지하부인 뿌리와 지상부에 흡수된 양은 처리방법과 게르마늄 종류에 따라서 매우 다른 양상을 나타냈는데, 관주처리의 경우 식물체내 흡수된 게르마늄 54.5 mg중 지상부에 약 53.9 mg, 지하부인 뿌리에 약 0.27 mg이 분포되어 거의 대부분이 지상부로 이동하였으며, 유기게르마늄의 경우에는 전체 흡수된 게르마늄 약 27 mg중 지상부에 약 9.2 mg, 지하부에 약 17.8 mg이 흡수되어 무기게르마늄과는 다른 흡수양상을 보였다. 엽면처리에서는 무기게르마늄의 경우에는 식물체내 흡수된 게르마늄 약 3.6 mg중 지상부에 약 3.5 mg, 지하부에 약 0.1 mg이 흡수되어 관주처리와 유사한 양상을 보였지만, 유기게르마늄의 경우에는 관주처리에서와는 달리 식물체내 흡수된 전체 게르마늄 약 3.13 mg중 지상부에 약 3.05 mg, 지하부에 약 0.08 mg이 흡수되어 거의 대부분이 지상부에 흡수되어 있는 것으로 나타나 유기게르마늄은 식물체내에서 이동이 잘 안되는 것으로 생각되었다. 그리고 엽면+관주처리에서는 무기게르마늄 및 유기게르마늄 처리 모두에서 관주처리와 유사한 경향을 보였다.

그리고 식물체 지상부 길이 (높이)별 게르마늄 흡수량은 무기 및 유기게르마늄 처리구 모두 뿌리와 가까울 수록 흡수된 양이 많았고, 뿌리와 멀어질수록 흡수된 양이 적었다. stage별 흡수량은 게르마늄 처리방법에 따른 뚜렷한 차이는 나타나지 않았으며 관주처리의 경우 무기게르마늄 처리구에서는 bottom stage (35.0 mg) > middle stage (15.03 mg) > top stage (6.86 mg)이었고, 유기게르마늄 처리구에서도 bottom stage (5.32 mg) > middle stage (3.17 mg) > top stage (0.65 mg)순으로서 무기게르마늄에 비하여 top stage의 흡수량이 훨씬 낮아 유기게르마늄은 무기게르마늄에 비하여 식물체내 이동이 잘 안되는 것으로 생각되었다.

각 stage별 과실인 오이, 잎, 잎줄기 및 줄기에 흡수된 게르마늄 양을 조사한 결과 관주처리구에서는 무기게르마늄의 경우 전체적으로 잎에 가장 많은 양이 흡수되어 있었으며 bottom stage의 경우 잎 (20.3 mg) ≫ 줄기 (5.2 mg) ≥ 잎줄기 (4.9 mg) > 과실 (1.7 mg) 순으로 잎에 가장 많은 양이 흡수되어 있었고, 유기게르마늄의 경우에는 전반적으로 무기게르마늄에 비하여 과실인 오이에 흡수되는 양이 많았으며 bottom stage의 경우 잎 (2.1 mg) ≥ 과실 (1.9 mg) ≫ 줄기 (0.7 mg) = 잎줄기 (0.7 mg)로 잎과 과실에 주로 흡수되어 있었다.



Table 3-20. 게르마늄 처리방법에 따른 식물체 부위별 건조중량과 게르마늄 함량

Site		Dry weight (g)							
		Control	Irrigation		Spray		Irrigation+Spray		
			GeO <sub>2</sub>	Ge-132	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	
Shoot	Top stage	Fruit	0.24	0.04	0.22	0.18	0.21	0.07	0.20
		Leaf	2.09	0.36	1.91	1.57	1.81	0.60	1.73
		Petiole	0.17	0.03	0.16	0.13	0.15	0.05	0.14
		Stem	0.82	0.14	0.75	0.62	0.71	0.23	0.68
	Middle stage	Fruit	8.66	1.48	7.91	6.50	7.52	2.47	7.17
		Leaf	7.32	1.25	6.68	5.49	6.35	2.09	6.06
		Petiole	0.83	0.14	0.76	0.62	0.72	0.24	0.69
		Stem	1.94	0.33	1.77	1.45	1.68	0.55	1.61
	Bottom stage	Fruit	14.80	2.53	13.52	11.10	12.85	4.22	12.26
		Leaf	13.73	2.35	12.54	10.30	11.92	3.91	11.37
		Petiole	2.31	0.40	2.11	1.73	2.01	0.66	1.91
		Stem	3.28	0.56	3.00	2.46	2.85	0.94	2.72
Root		2.43	0.45	2.04	2.75	2.82	0.58	2.54	

Table 3-21. 게르마늄 처리용액내 투입된 전체 게르마늄 함량중 식물체내로 흡수된 양

Site	Ge uptake (mg 3plant <sup>-1</sup> )							
	Irrigation		Spray		Irrigation+Spray			
	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	GeO <sub>2</sub>	Ge-132		
Total Ge contents								
in initial solution (mg 20L <sup>-1</sup> )	198.9 (100*)	199.1 (100*)	20.1 (100*)	19.9 (100*)	109.7 (100*)	110.2 (100*)		
Top stage	Fruit	— (0.17)	0.05 (0.02) (0.14)	0.005 (0.02) (0.14)	0.01 (0.07) (0.42)	0.27 (0.25) (0.67)	0.03 (0.03) (0.17)	
	Leaf	5.27 <sup>a</sup> (2.65 <sup>b</sup> ) (9.72 <sup>c</sup> )	0.36 (0.18) (1.32)	0.06 (0.29) (1.59)	0.07 (0.38) (2.39)	2.33 (2.12) (5.70)	0.16 (0.14) (0.96)	
	Petiole	0.30 (0.15) (0.55)	0.06 (0.03) (0.24)	0.01 (0.03) (0.15)	0.004 (0.02) (0.13)	0.22 (0.20) (0.54)	0.03 (0.03) (0.18)	
	Stem	1.29 (0.65) (2.38)	0.23 (0.11) (0.85)	0.03 (0.14) (0.77)	0.03 (0.13) (0.81)	0.79 (0.72) (1.93)	0.12 (0.11) (0.75)	
	Total	6.86 (3.45) (12.66)	0.65 (0.33) (2.41)	0.09 (0.45) (2.50)	0.10 (0.52) (3.19)	3.34 (3.04) (8.18)	0.31 (0.28) (1.91)	
	Middle stage	Fruit	— (4.59)	1.24 (0.62) (4.59)	0.39 (1.93) (10.78)	0.31 (1.54) (9.81)	2.18 (1.99) (5.33)	0.68 (0.61) (4.17)
		Leaf	10.3 (5.19) (19.05)	1.18 (0.59) (4.36)	0.88 (4.36) (24.36)	0.70 (3.52) (22.36)	7.65 (6.97) (18.73)	1.00 (0.91) (6.15)
		Petiole	1.75 (0.88) (3.23)	0.27 (0.13) (0.99)	0.03 (0.14) (0.80)	0.03 (0.14) (0.87)	1.22 (1.12) (3.00)	0.15 (0.14) (0.94)
		Stem	2.95 (1.48) (5.45)	0.48 (0.24) (1.79)	0.06 (0.29) (1.62)	0.05 (0.26) (1.64)	2.29 (2.09) (5.60)	0.25 (0.23) (1.53)
	Total	15.03 (7.56) (27.73)	3.17 (1.59) (11.74)	1.35 (6.73) (37.5)	1.09 (5.45) (34.82)	13.34 (12.16) (32.66)	2.08 (1.88) (12.82)	
Bottom stage	Fruit	1.67 (0.84) (3.08)	1.88 (0.94) (6.95)	0.29 (1.44) (8.02)	0.57 (2.85) (18.12)	3.48 (3.18) (8.53)	1.11 (1.01) (6.87)	
	Leaf	20.3 (10.23) (37.53)	2.05 (1.03) (7.59)	1.55 (7.73) (43.15)	1.14 (5.74) (36.47)	12.4 (11.26) (30.25)	1.67 (1.52) (10.30)	
	Petiole	4.89 (2.46) (9.02)	0.69 (0.35) (2.56)	0.11 (0.55) (3.05)	0.04 (0.21) (1.35)	3.43 (3.13) (8.40)	0.33 (0.30) (2.03)	
	Stem	5.15 (2.59) (9.50)	0.70 (0.35) (2.61)	0.10 (0.47) (2.65)	0.10 (0.48) (3.06)	4.32 (3.94) (10.58)	0.31 (0.29) (1.94)	
Total	32.05 (16.11) (59.13)	5.32 (2.67) (19.70)	2.05 (10.19) (56.94)	1.85 (9.28) (59.11)	23.59 (21.50) (57.75)	3.43 (3.11) (21.15)		
Shoot total	53.94 (27.12) (100*)	9.18 (4.61) (100*)	3.50 (17.39) (100*)	3.05 (15.32) (100*)	40.55 (36.96) (100*)	5.84 (5.30) (100*)		
Root total	0.27 (0.13)	17.8 (8.95)	0.11 (0.53)	0.08 (0.42)	0.30 (0.28)	10.4 (9.42)		

라. 과실 (오이) 부위별 게르마늄 분포

오이의 식용 부위인 과실의 부위별 게르마늄 분포함량을 비교 검토하기 위하여 Fig. 3-51 (B, C)와 같이 지상부 아래쪽인 bottom stage의 과실인 오이를 꼭지 부분 (stalk), 꼭지 옆 부분 (part I), 중간 부분 (part II), 윗 부분 (part III)으로 구분하고, 또한 오이의 식용 부분을 껍질 (rind), 과육 (pulp), 오이 속 (seeds)으로 구분하여 각 부위별 게르마늄 함량 분포 특성을 비교 검토한 결과는 Table 3-22 및 Fig. 3-60에서 보는 바와 같다.

과실인 오이를 꼭지 (stalk)와 꼭지로부터 거리에 따라 꼭지 옆 부분 (part I), 중간 부분 (part II), 윗부분 (part III)으로 구분하여 각 부위별 게르마늄 함량 분포를 조사한 결과 (Table 3-22), 부위별 게르마늄 함량 분포는 전체적으로 모든 처리구에서 꼭지에 가장 높은 농도로 분포되어 있었으며, 과실인 오이 길이에 따라서는 무기게르마늄의 경우에는 모든 처리방법에서 전반적으로 꼭지와 가까운 part I에 가장 높은 농도로 분포되어 있었고, 유기게르마늄의 경우에는 전체적으로 과실 길이별로 뚜렷한 경향 없이 비교적 일정한 농도로 고르게 분포되어 있었다.

그리고 과실의 식용 부위인 오이 껍질 (rind), 과육 (pulp), 오이 속 (seeds)의 게르마늄 분포 함량 (Fig. 3-60)은 게르마늄 처리방법에 따른 차이는 없었으며, 각 부위별 게르마늄 분포함량은 전체적으로 모든 처리구에서 껍질 (52.7-37.1%) > 과육 (36.6-31.5%) > 오이 속 (26.7-15.7%) 순으로 과실의 부위에 따라서도 분포 정도에 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

Table 3-22. 오이 부위별 게르마늄 함량 분포

Site	Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )							
	Control	Irrigation		Spray		Irrigation+Spray		
		GeO <sub>2</sub>	Ge-132	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	
Stalk	0.114	1717.0	121.3	19.4	28.4	1137.4	60.3	
Part I	Rind	0.000	487.7	68.3	14.8	14.7	377.6	40.9
	Pulp	0.000	358.2	49.2	4.2	14.0	280.4	29.2
	Seeds	0.012	159.9	28.3	1.2	9.9	130.5	25.0
Part II	Rind	0.013	410.9	72.4	9.3	15.6	286.1	39.0
	Pulp	0.002	228.5	45.9	8.3	14.5	185.3	27.4
	Seeds	0.002	94.4	33.6	7.3	9.2	91.6	23.3
Part III	Rind	0.002	397.7	61.1	8.3	17.7	242.9	37.8
	Pulp	0.002	190.3	38.3	8.0	18.9	102.8	25.1
	Seeds	0.002	132.1	27.1	5.5	15.0	96.0	24.5

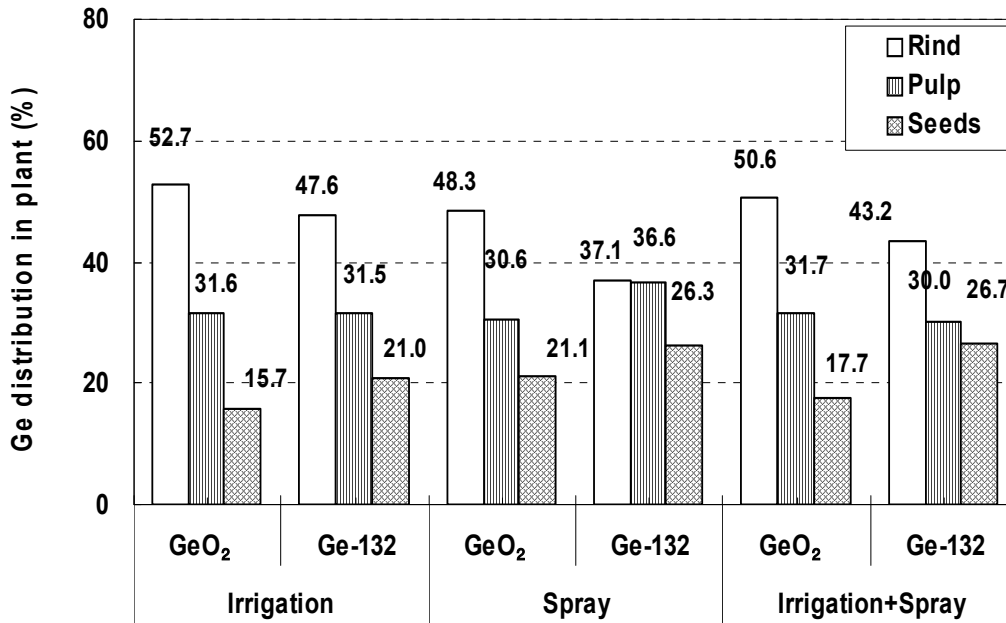


Fig. 3-60. 오이 부위별 (rind, pulp and seeds) 게르마늄 함량 분포

마. 처리방법별 식물체내 게르마늄 흡수율 구명 및 최적처리방법 구명

게르마늄 처리방법에 따른 식물체 부위별로 흡수된 게르마늄 총량을 이용하여 식물체 부위별 흡수율을 종합 검토한 결과는 Table 3-23 및 Fig. 3-61, 3-62, 3-63에서 보는 바와 같다. 시험 기간 동안 게르마늄 처리용액 내 투입된 총 게르마늄 함량은 게르마늄 종류별 및 처리방법별로 전체 시험구에 투입된 게르마늄 함량으로서 양액 내 처리는 약 200 mg, 엽면처리는 약 20 mg, 양액내처리+엽면처리는 약 110 mg이며, 식물체내 총 게르마늄 흡수량은 각 시험 처리구 식물체 3주의 흡수량을 부위별 총 건조중량으로 환산한 값이다.

용액내 투입된 전체 게르마늄 중 식물체내로 흡수된 게르마늄 흡수율은 무기게르마늄의 경우 관주처리에서 약 27.3%, 엽면처리에서는 약 17.9%, 관주+엽면처리에서 약 37.2%로서 전체 이용효율은 관주처리와 엽면처리를 병행하였을 경우에 더 높았으며, 유기게르마늄 처리구의 경우에는 관주처리에서 약 13.6%, 엽면처리에서 약 15.8%, 엽면+관주처리에서 약 14.7%로서 엽면처리에 의해 약간 흡수효율이 증가되는 경향이 보였으나 큰 차이는 없었다.

그리고 전체 투입된 게르마늄에 대한 식물체내에 흡수된 게르마늄의 흡수율 분포는 관주처리의 경우 (Fig. 3-61), 무기게르마늄 처리에서는 시험기간 동안 투입된 전체 게르마늄 투입량의 약 72.8%가 용액 중에 잔류되어 있었고 약 27.2%가 식물체내로 흡수되었으며, 흡수된 게르마늄은 잎에 약 18.7%, 줄기에 약 4.7%, 잎줄기에 약 3.5%, 과실인 오이에 약 0.8%, 뿌리에 약 0.13%가 분포되어 흡수된 게르마늄의 대부분이 지상부로 이동된 것을 알 수 있었다. 유기게르마늄 처리에서는 초기 게르마늄 투입량의 약 86.4%가 용액 중에 잔류되어 있었고 약 13.6%가 식물체내로 흡수되어 무기게르마늄에 비하여 흡수이용효율이 낮은 것으로 나타났다. 그리고 식물체내로 흡수된 게르마늄은 뿌리에 약 9.0%, 잎에 약 1.8%, 과일에 약 1.5%, 줄기와 잎줄기에

각각 약 0.7% 및 0.5%가 함유되어 있어 지하부인 뿌리에 주로 흡수되어 있었다.

그리고 엽면처리 (Fig. 3-62) 경우에는 무기게르마늄 처리에서는 전체 게르마늄 투입량의 약 82.1%가 용액 중에 잔류되어 있었고 약 17.9%만이 식물체내로 흡수되어 관주처리에 비하여 식물체 흡수이용효율이 떨어졌으며, 관주처리에 비하여 과실인 오이 내 흡수율이 증가되었다. 유기게르마늄 처리에서는 전체적인 흡수이용효율은 관주처리와 별 차이가 없었으며 관주처리에 비하여 잎과 과실 내 흡수율이 크게 증가되었으며 뿌리 내 흡수율이 매우 크게 감소되었다.

관주+엽면처리의 경우 (Fig. 3-63)에는 무기게르마늄 처리구에서는 전체 게르마늄 투입량의 약 62.8%가 용액 중에 잔류되어 있었고 약 37.2%가 식물체내로 흡수되어 관주처리와 엽면처리에 비하여 식물체 흡수이용효율이 매우 높았으며 흡수된 게르마늄은 식물체 부위별로 잎 (20.4%) >> 줄기 (6.7%) > 과실 (5.4%) > 잎줄기 (4.5%) >> 뿌리 (0.3%)로서 관주처리와 관주+엽면처리에 비하여 과실인 오이내로 흡수되는 양이 크게 증가되었다. 그리고 유기게르마늄 처리의 경우에는 처리방법에 따른 식물체 흡수이용효율에 별 차이가 없이 거의 일정한 이용효율 (14-15%)을 보였으며, 엽면처리에서 과실인 오이 내 흡수율이 크게 증가되었다.

따라서 게르마늄 처리방법에 따른 식물체 성장반응과 식물체내 게르마늄 분포농도, 흡수량 및 흡수율 등의 결과들을 종합적으로 비교 검토해 볼 때 무기게르마늄의 경우에는 관주처리와 엽면처리를 동시에 하는 방법이 더 효과적이었으며, 유기게르마늄의 경우에는 처리방법에 따른 식물체 전체 이용효율에는 큰 차이가 없었으나 엽면처리에서 흡수된 게르마늄의 지상부로의 이동효율이 높았고 또한 과실인 오이 내 흡수효율이 관주처리와 관주+엽면처리에 비하여 매우 높았으므로 엽면처리가 더 효과적일 것으로 판단되었다.

Table 3-22. 게르마늄 처리방법에 따른 식물체 부위별 게르마늄 총흡수량 및 흡수율

Site	Ge uptake (mg 3plant <sup>-1</sup> )						
	Irrigation		Spray		Irrigation+Spray		
	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	GeO <sub>2</sub>	Ge-132	
Total Ge contents							
in initial solutions	198.9 (100*)	199.1 (100*)	20.1 (100*)	19.9 (100*)	109.7 (100*)	110.2 (100*)	
(mg 3plant <sup>-1</sup> )							
Shoot	Fruit	1.67 <sup>a</sup> (0.84 <sup>b</sup> ) (3.08 <sup>c</sup> )	3.16 (1.59) (11.71)	0.68 (3.39) (18.94)	0.89 (4.46) (28.35)	5.94 (5.41) (14.53)	1.82 (1.65) (11.21)
	Leaf	35.94 (18.07) (66.31)	3.58 (1.80) (13.27)	2.49 (12.38) (69.11)	1.92 (9.63) (61.22)	22.33 (20.36) (54.67)	2.83 (2.56) (17.42)
	Petiole	6.94 (3.49) (12.80)	1.02 (0.51) (3.79)	0.14 (0.72) (4.00)	0.07 (0.37) (2.35)	4.88 (4.45) (11.94)	0.51 (0.46) (3.15)
	Stem	9.39 (4.72) (17.33)	1.42 (0.71) (5.25)	0.18 (0.90) (5.04)	0.17 (0.87) (5.51)	7.40 (6.74) (18.11)	0.69 (0.62) (4.22)
Root	0.27 (0.13) (0.49)	17.81 (8.95) (65.99)	0.11 (0.53) (2.97)	0.08 (0.42) (2.70)	0.30 (0.28) (0.74)	10.38 (9.42) (64.01)	
Total	54.20 (27.25) (100*)	26.99 (13.56) (100*)	3.60 (17.92) (100*)	3.13 (15.75) (100*)	40.85 (37.24) (100*)	16.22 (14.72) (100*)	

**F r**

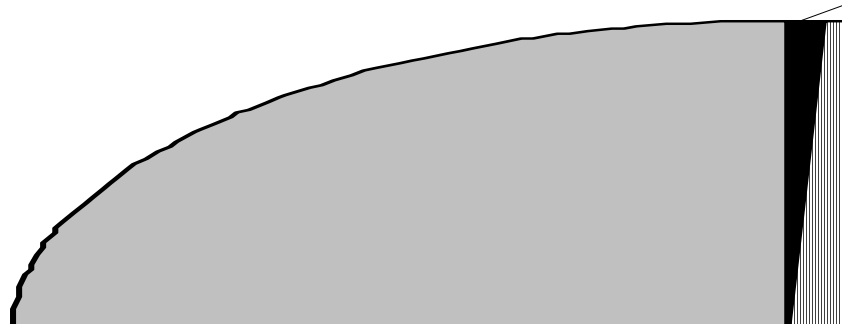


Fig. 3-60. 게르마늄 양액내처리에서의 전체 투입된 게르마늄의 양액내 잔존율과 식물체 부위별 흡수율 분포

**F r u**

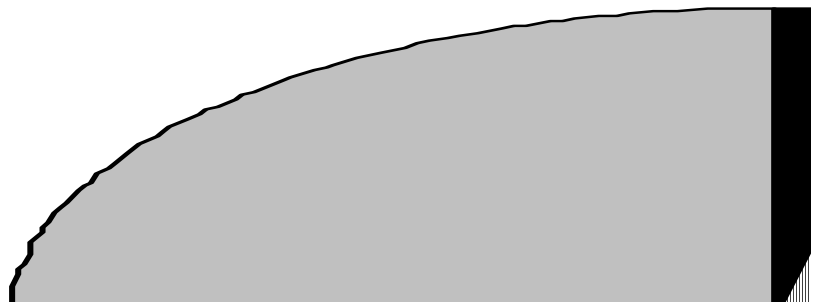


Fig. 3-61. 게르마늄 엽면처리에서의 전체 투입된 게르마늄의 양액내 잔존율과 식물체 부위별 흡수율 분포

**F r u i t 5**

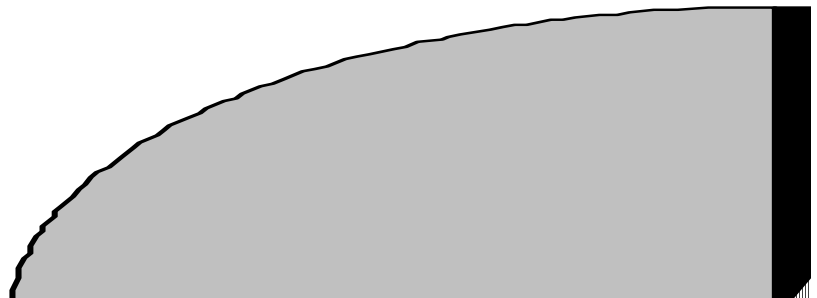


Fig. 3-62. 게르마늄 양액내처리+엽면처리에서의 전체 투입된 게르마늄의 양액내 잔존율과 식물체 부위별 흡수율 분포

## 5. 고행배지경 (필라이트경)을 이용한 게르마늄 최적처리방법 및 최적 처리농도 구명

### 가. 오이재배 및 게르마늄 처리 방법

#### (1) 오이재배 방법

고행배지경 (필라이트경)을 이용한 오이재배시 게르마늄 최적처리방법과 최적 처리농도를 구명하기 위하여 고행배지경 재배방법중의 하나인 필라이트경을 사용하여 오이 생육특성 및 오이 내 게르마늄 흡수특성을 비교 검토하였다. 고행배지경으로 사용된 베드는 L 500cm × W 80cm × H 40cm인 스티폴수지 성형 베드로서 베드 하단에 나일론 천을 설치하고, 배지는 perlite를 30cm 깊이로 충전하였다. 공급양액은 베드 상단에 점적호수를 2줄로 설치하고 점적식으로 공급하였다. 양액농도는 정식 후 2주 동안은 일본원예시험장 표준양액의 1/2배액을, 그 이후에는 3/4배액을 순환펌프와 타이머를 이용하여 하루에 3시간 간격으로 5분씩 공급하였으며, 비순환식으로 관리하였다. 오이 육묘는 본 실험 2장인 육묘를 2007년 4월 28일 정식한 후 2007년 6월 18일 까지 52일간 재배하면서 bottom stage의 오이 생육조사를 위한 식물체와 전체 생육조사 및 게르마늄 함량 측정을 위한 식물체로 나누었다. 오이 과실 생육 조사를 위한 시료채취는 2007년 5월 30일 (정식 후 33일), 6월 6일 (정식 후 40일) 및 6월 16일 (정식 후 50일)에 수확하여 생육 조사를 실시하였으며, 식물체 전체 생육 조사 및 게르마늄 함량 측정을 위한 시료채취는 6월 18일 (정식 후 52일)에 실시하였다.

#### (2) 게르마늄 처리방법

게르마늄 처리는 본 실험 2장인 오이 육묘를 정식 후 28 일부터 무기게르마늄 ( $\text{GeO}_2$ )과 유기게르마늄 (Ge-132) 모두 각각 5, 10, 15 mg L<sup>-1</sup> 농도로 ① 관주 처리, ② 엽면처리, ③ 관주 처리+엽면처리의 3가지 방법으로하였다. 관주처리는 한 주당 200 ml씩 3일 간격으로 6회 처리하였고, 엽면처리는 한주당 100 ml (0.2%-Tween 80)씩 3일 간격으로 스프레이로 엽면 살포하였다. 그리고 관주처리+엽면처리는 게르마늄 농도가 각각 2.5, 5, 7.5 mg L<sup>-1</sup>인 용액을 오이 한 주당 200ml씩 3일 간격으로 뿌리에 관주처리하고 동시에 게르마늄 농도가 5, 10, 15 mg L<sup>-1</sup>인 용액 (0.2%-Tween 80)을 스프레이로 엽면 살포하였으며 1회당 살포량은 오이 1주 당 100 ml을 균일하게 살포하였다.

### 나. 게르마늄 처리방법 및 처리농도별 생육 특성

게르마늄 처리방법에 따른 식물체 지상부의 생육특성을 조사한 결과는 Fig. 3-64, 3-65, 3-66, 3-67, 3-68에서 보는 바와 같다. 게르마늄 처리방법 및 처리농도에 따른 지상부 생육 특성은 식물체 길이 (Fig. 3-65)는 무기 및 유기게르마늄 처리구 모두 게르마늄 처리방법과 처리농도에 따른 뚜렷한 차이가 나타나지 않았으며 대조구와도 거의 유사하였으나, 생체중 (Fig. 3-66)은 처리방법과 처리농도에 따라 약간의 차이가 있었다. 게르마늄 처리방법에 따른 각 농도별 생체중을 전체 생체중으로 환산하여 게르마늄 처리방법별 생육상황을 비교 검토한 결과 (Fig. 3-67), 관주처리의 경우 무기게르마늄 처리에서는 대조구에 비하여 약 3.3%의 생체중 감

소가 있었으나 유기게르마늄 처리에서는 대조구보다 약 3.8% 생체중이 증가되었다. 엽면처리의 경우에는 무기 및 유기게르마늄 처리구 모두에서 생체중이 감소되었으며 무기게르마늄 처리에서는 약 8.7%, 유기게르마늄 처리에서는 약 1.6% 감소되었다. 관주+엽면처리의 경우에는 무기게르마늄 처리에서는 생체중이 약 5.1% 감소되었고 유기게르마늄 처리에서는 대조구와 차이가 없었다. 게르마늄 처리방법에 따른 생육은 식물체 전체 길이는 처리방법에 따라서 별 차이가 없었으나 생체중은 차이가 있었다. 전체적으로 관주처리에 비하여 엽면처리에서 생육감소가 높아 소액 담액경을 이용한 연구결과와는 약간 다른 경향을 보였는데, 이는 고행배지경 재배시 시비된 게르마늄 총 함량이 비고행배지경에 비하여 적었고, 또한 비고행배지경에 비하여 시비된 게르마늄 용액이 빠른 시간내에 근권부위로 부터 이탈되는 현상도 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 따라서 게르마늄 처리방법에 따른 생육 감소 정도는 엽면처리 > 관주+엽면처리 > 관주처리 순으로서 생육적인 측면만을 고려할 때 게르마늄 최적처리방법은 유기게르마늄의 경우에는 세가지 처리방법 모두 별 차이가 없었으나 무기게르마늄의 경우에는 관주처리가 가장 양호한 것으로 나타났다.

그리고 게르마늄 처리농도에 따른 생체중 (Fig. 3-68)은 무기게르마늄의 경우 처리농도가 높을수록 생체중 감소 정도가 증가되었으며  $5 \text{ mg L}^{-1}$  처리농도에서 대조구에 비하여 약 3.4%,  $10 \text{ mg L}^{-1}$  처리농도에서 약 5.0%,  $15 \text{ mg L}^{-1}$  처리에서 약 8.7% 감소되었다. 반면에 유기게르마늄 처리구에서는 세 처리농도 모두에서 대조구과 거의 유사한 생장을 보였다.



Fig. 3-64. 고행배지경을 이용한 오이재배 전경



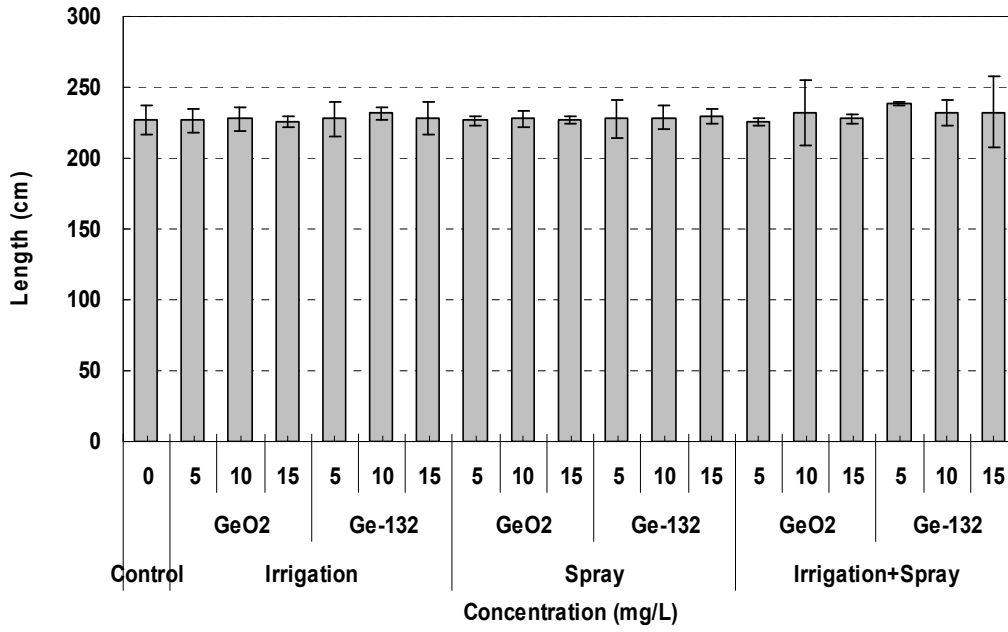


Fig. 3-65. 게르마늄 처리방법 및 처리농도에 따른 지상부 길이 비교

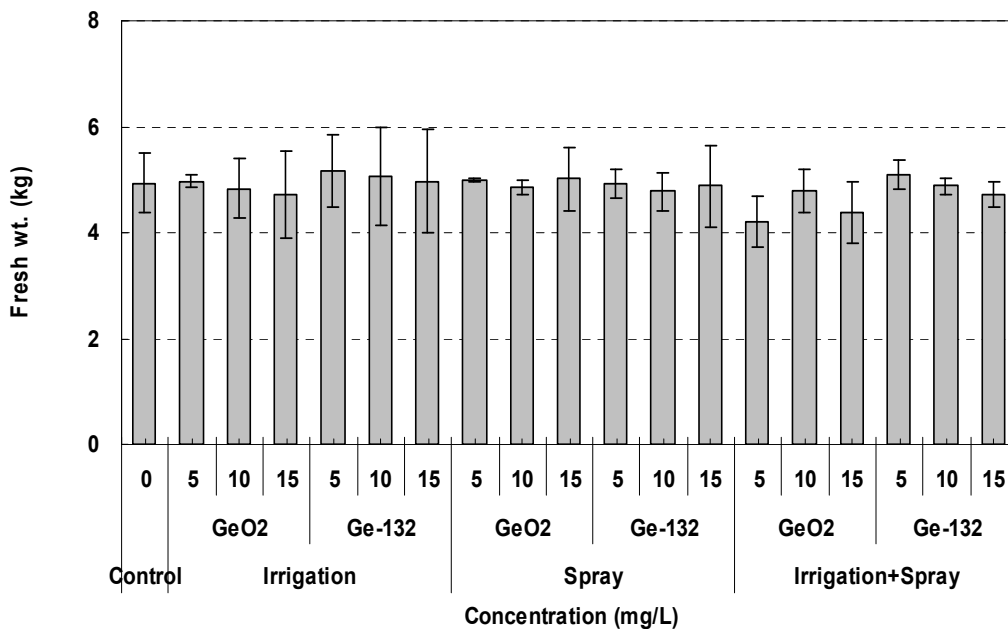


Fig. 3-66. 게르마늄 처리방법 및 처리농도에 따른 생체중 비교

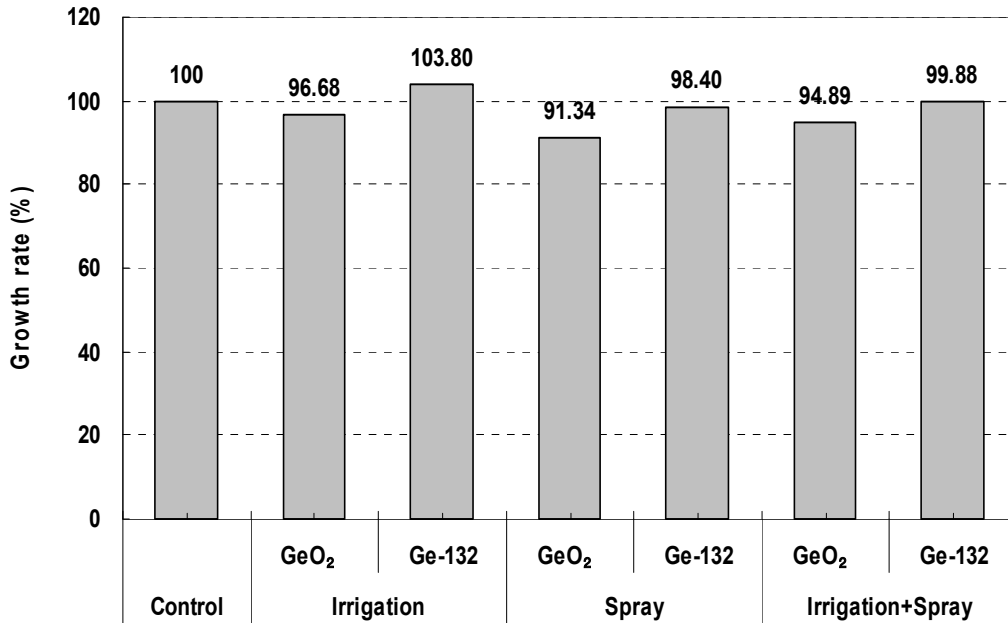


Fig. 3-67. 게르마늄 처리방법에 따른 게르마늄 종류별 생장을 비교

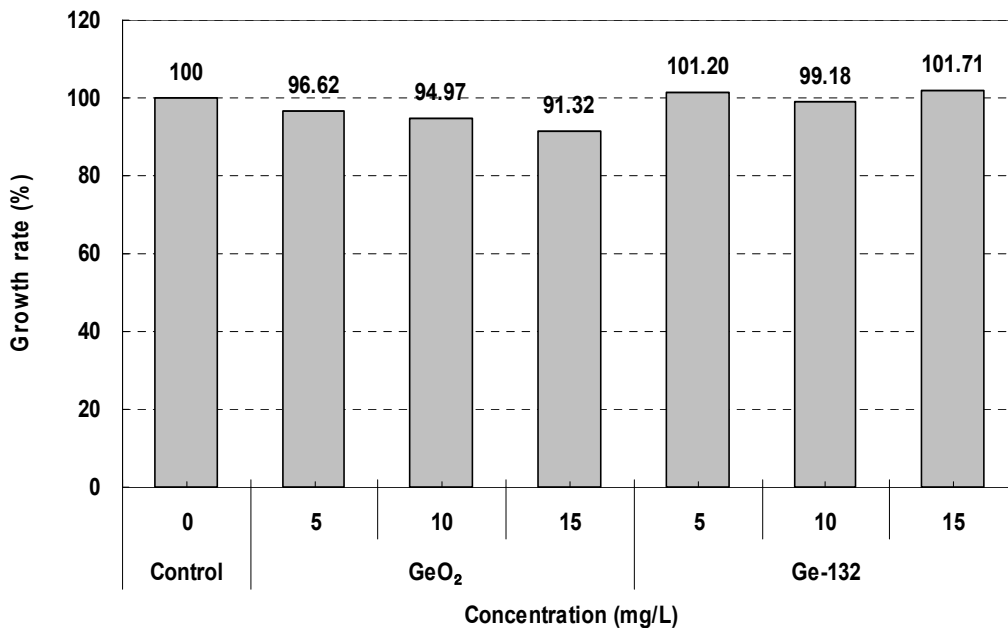


Fig. 3-68. 게르마늄 처리방법에 따른 게르마늄 종류별 생체중 변화율

#### 다. 게르마늄 처리방법 및 처리농도별 과실 (오이) 성장 특성

게르마늄 처리방법 및 처리농도에 따른 과실 (오이) 형성 특성을 조사한 결과는 Table 3-24, 3-25 및 Fig. 3-69, 3-70, 3-71에서 보느냐와 같다. Table 3-24는 bottom stage (지상부 70 cm 아래)의 과실 (오이)을 생육시기별로 정식 33일, 40일, 50일 총 3회에 걸쳐 과실 성장 특성을 조사한 결과이며, 각 시기별 게르마늄 처리횟수는 각각 2회, 4회, 6회이다. 생육시기에 따른 게르마늄 처리방법별 및 처리농도별 과실의 길이, 중량 및 둘레의 길이 등은 뚜렷한 차이가 없었다.

그리고 오이 정식 52일 후 수확 (재배기간 동안 수확하지 않고 정식 52일 후 한번 수확)된 과실의 총 개수 및 과실 중량 (Table 3-25, Fig. 3-69, 3-70, 3-71)은 무기게르마늄 처리의 경우 전체 과실 중량이 관주처리에서 대조구에 비하여 약 4.5%, 엽면처리에서 약 9.0%, 관주+엽면처리에서 약 2.6%가 감소되어 엽면처리에 비하여 관주처리와 관주+엽면처리구에서 양호하였다. 유기게르마늄 처리구의 경우에는 관주처리에서 대조구와 별 차이가 없었고 엽면처리와 관주+엽면처리에서는 대조구에 비하여 전체 과실 중량이 약 5-6% 정도 증가되었다. 게르마늄 처리농도에 따른 전체 과실 중량도 무기게르마늄 처리에서는 처리농도가 증가할 수록 과실 중량이 감소되었으며, 유기게르마늄 처리구에서는 대조구와 거의 비슷하거나 약간 더 증가되는 경향을 보였다.

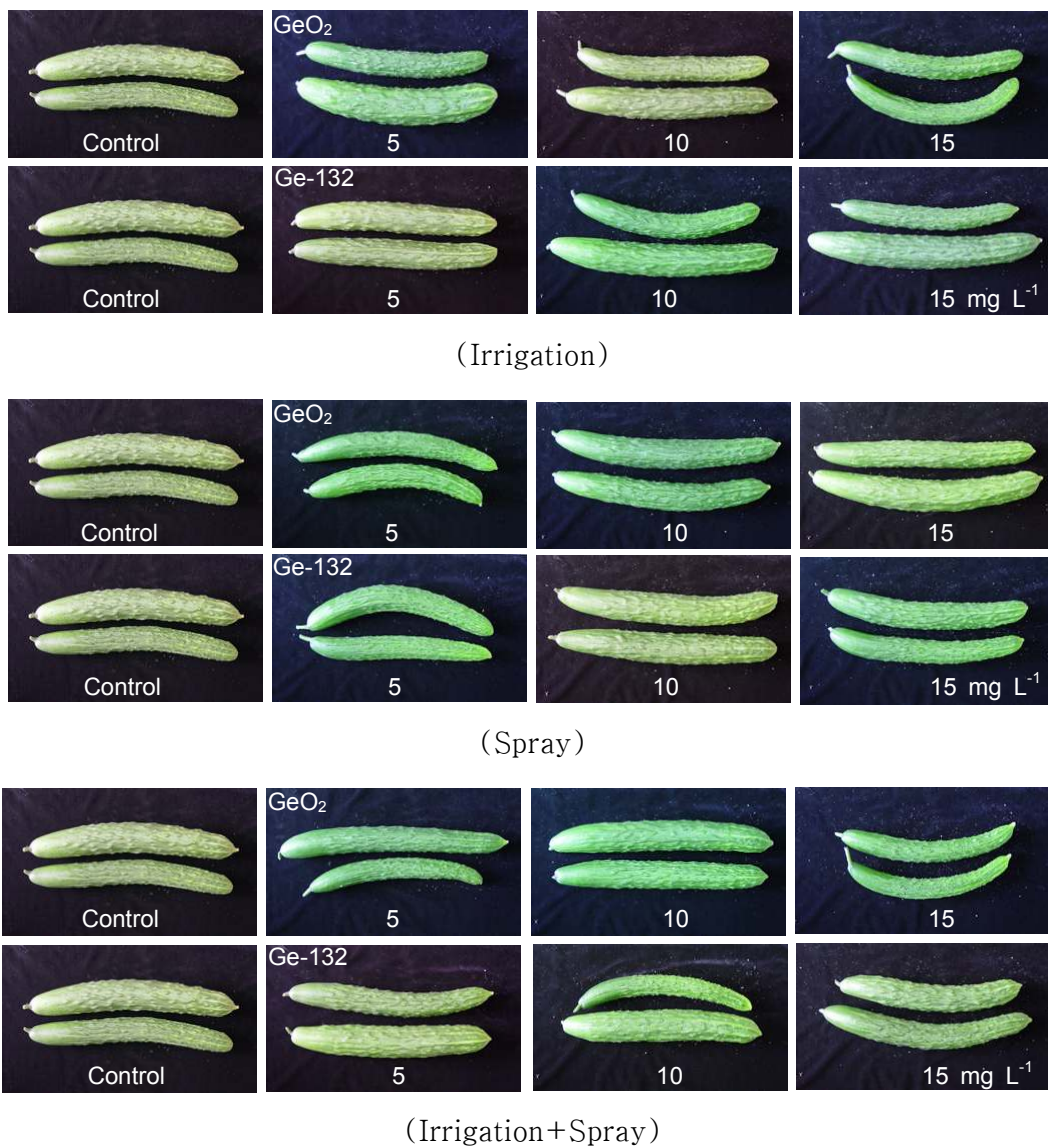


Fig. 3-69. 게르마늄 처리방법 및 처리농도에 따른 생장 52일 후의 bottom stage의 과실 (오이)

Table 3-24. 게르마늄 처리방법 및 처리농도에 따른 생장 52일 후의 bottom stage의 과실 (오이) 형성 특성

Treatment (mg L <sup>-1</sup> )		At date of harvesting (Days after transplanting : d.a.t)										
		5/30 (33 d.a.t)			6/6 (40 d.a.t)			6/13 (50 d.a.t)				
		Length (cm)	Weight (g)	Girth (cm)	Length (cm)	Weight (g)	Girth (cm)	Length (cm)	Weight (g)	Girth (cm)		
Control	0	27.1	242.7	12.4	34.7	360.5	13.3	33.2	313.2	11.7		
	5	26.8	238.9	12.1	33.6	327.3	13.4	32.8	245.8	10.9		
	GeO <sub>2</sub>	10	26.3	243.5	12.8	33.4	361.6	14.0	32.3	237.9	10.6	
		15	25.4	228.1	11.5	30.3	265.4	11.3	30.7	233.7	11.0	
	Irrigation	5	24.7	214.7	12.3	33.9	398.7	14.4	34.1	324.1	13.0	
		Ge-132	10	27.2	233.7	12.6	31.8	298.1	12.8	32.9	252.4	11.1
			15	27.6	248.8	12.9	36.6	440.9	14.9	34.8	240.2	12.1
Spray	5	27.1	223.6	12.1	30.9	272.7	12.4	32.0	254.8	10.8		
	GeO <sub>2</sub>	10	25.1	211.9	12.2	31.7	287.6	12.6	29.3	203.9	9.8	
		15	24.4	192.1	11.6	30.4	292.8	11.7	28.4	213.3	11.4	
	5	27.7	247.3	12.7	33.4	286.1	11.5	34.1	301.7	11.6		
	Ge-132	10	24.5	215.6	11.0	35.6	397.2	14.5	35.4	300.6	11.0	
		15	23.5	210.1	10.9	33.2	271.7	12.1	31.1	309.9	12.3	
	Irrigation + Spray	5	26.5	255.6	13.1	34.2	321.3	12.8	31.7	236.6	11.6	
GeO <sub>2</sub>		10	25.2	285.2	15.4	35.5	385.1	13.7	30.9	225.0	11.2	
		15	24.0	249.7	12.0	29.3	231.6	11.8	30.6	219.9	11.0	
5		26.6	230.5	12.8	34.4	363.4	13.2	32.0	306.6	12.4		
Ge-132		10	26.2	256.9	13.3	37.4	416.2	13.9	33.0	326.3	12.9	
		15	27.4	250.2	12.5	34.8	313.8	12.6	32.9	254.9	11.6	

Table 3-25. 게르마늄 처리방법 및 처리농도에 따른 생장 52일 후의 과실 생체중 및 과실수

Treatment (mg L <sup>-1</sup> )		Total fresh weights of fruits (g)			Total numbers of fruits		
		Middle stage	Bottom stage	Total	Middle stage	Bottom stage	Total
Control	0	403.0	1862.7	2265.7	1.67	3.67	5.34
	5	262.3	1646.3	1908.6	1.33	3.00	4.33
Irrigation	GeO <sub>2</sub> 10	389.0	1400.7	1789.7	2.00	2.67	4.67
	15	391.7	1321.3	1713.0	2.00	2.33	4.33
	5	417.7	1710.7	2128.4	2.00	3.33	5.33
	Ge-132 10	414.5	1703.1	2117.6	2.00	3.33	5.33
	15	258.3	1494.7	1753.0	1.00	2.67	3.67
Spray	5	398.0	1467.7	1865.7	2.00	2.67	4.67
	GeO <sub>2</sub> 10	387.7	1949.3	2337.0	2.33	3.67	6.00
	15	302.0	1420.0	1722.0	1.67	3.00	4.67
	5	377.7	1460.7	1838.4	1.33	2.33	3.66
	Ge-132 10	451.3	1404.0	1855.3	2.00	2.67	4.67
	15	301.3	1362.7	1664.0	1.33	2.33	3.66
Irrigation +Spray	5	372.0	1631.0	2003.0	2.00	3.00	5.00
	GeO <sub>2</sub> 10	218.0	1691.0	1909.0	1.00	3.33	4.33
	15	356.7	1372.7	1729.4	2.00	2.33	4.33
Ge-132	5	298.0	1957.0	2255.0	1.33	3.33	4.66
	10	243.7	1835.0	2078.7	1.00	3.53	4.53
	15	330.7	1607.3	1938.0	1.67	3.00	4.67

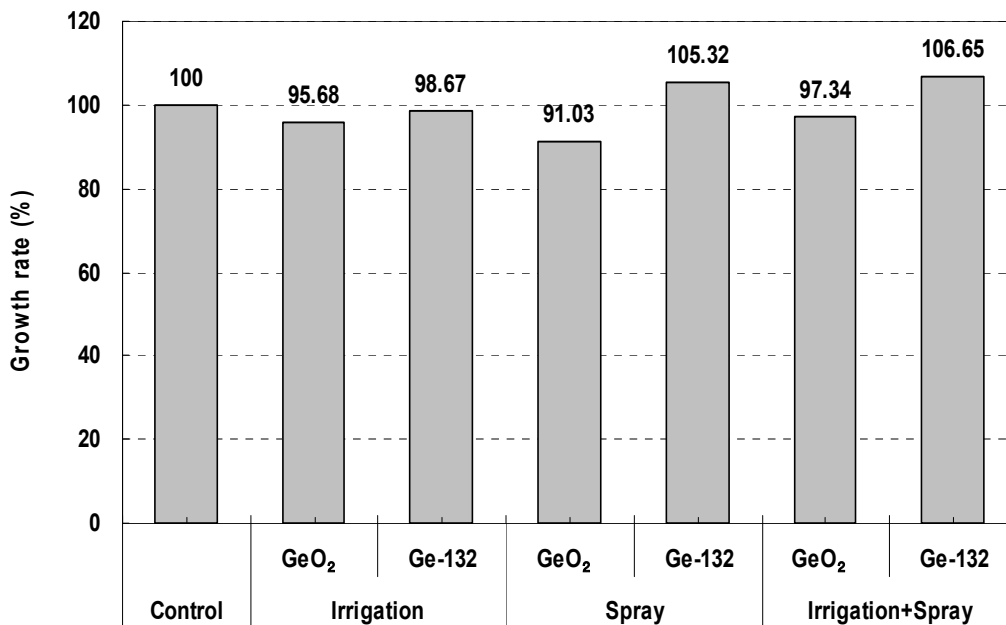


Fig. 3-70. 게르마늄 처리방법 및 처리농도에 따른 생장 52일 후의 과실의 총생체중 비교

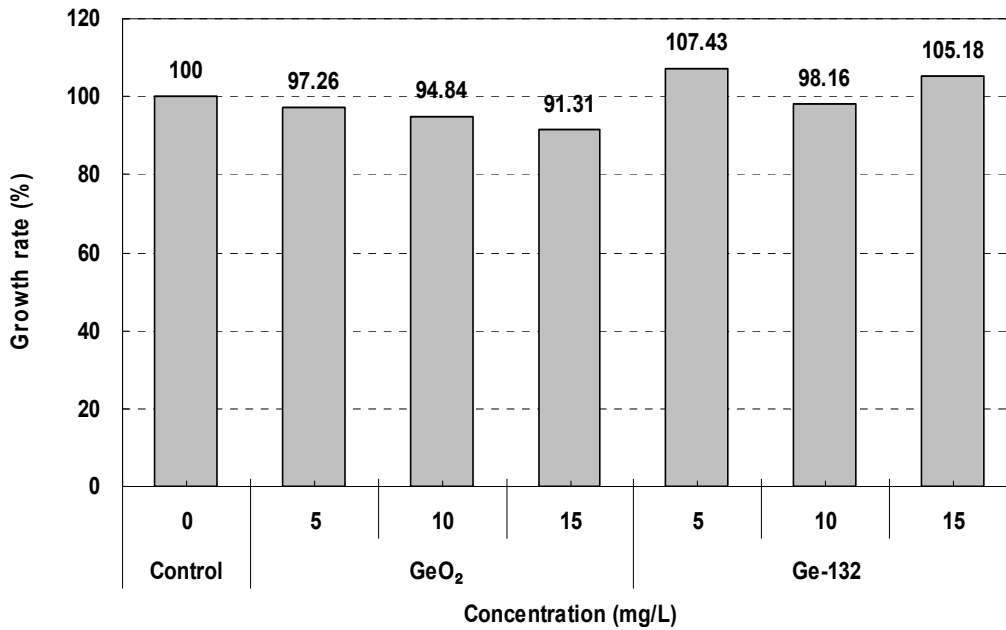


Fig. 3-71. 게르마늄 처리농도에 따른 생장 52일 후의 과실의 총생체중 비교

#### 라. 게르마늄 처리방법 및 처리농도별 과실내 게르마늄 흡수 특성

게르마늄 처리방법 및 처리농도에 따른 과실내 게르마늄 흡수 특성을 검토하기 위하여 정식 50일 후 수확한 bottom stage에 있는 오이의 게르마늄 함량을 비교 검토한 결과는 Fig. 3-72, 3-73, 3-74에서 보는 바와 같다.

게르마늄 처리방법에 따른 처리농도별 과실 내 게르마늄 함량 (Fig. 3-72)은 게르마늄 처리방법과 게르마늄 종류에 따라 차이가 있었다. 처리농도별 흡수량은 전체적으로 무기 및 유기게르마늄 처리구 모두에서 처리농도가 높을수록 과실 내 흡수량도 증가되었다. 관주처리의 경우에는 유기게르마늄 처리보다 무기게르마늄 처리에서 과실 내 흡수량이 높았으나 엽면처리와 관주+엽면처리에서는 유기게르마늄 흡수량이 무기게르마늄 처리구에 비하여 높았으며, 특히 엽면 처리에서는 유기게르마늄의 과실 내 흡수효율이 매우 증가되는 것으로 나타났다.

게르마늄 처리방법에 따른 전체 과실 내 게르마늄 평균함량 (Fig. 3-73)은 무기게르마늄 처리에서는 관주+엽면처리 ( $0.35 \text{ mg kg}^{-1}$ ) = 엽면처리 ( $0.34 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > 관주처리 ( $0.19 \text{ mg kg}^{-1}$ ) 순으로 관주처리에 비하여 엽면처리와 관주+엽면처리에서 높았으며 엽면처리와 관주처리+엽면처리에서는 거의 비슷한 흡수량을 보였다. 유기게르마늄 처리구의 과실내 게르마늄 함량은 엽면처리 ( $2.56 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ≫ 관주+엽면처리 ( $0.94 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ≫ 관주처리 ( $0.09 \text{ mg kg}^{-1}$ ) 순으로 관주처리에 비하여 엽면처리와 관주+엽면처리에서 훨씬 높았다. 전체적으로 펠라이트를 이용한 고품배지경의 오이재배에서는 오이 내 게르마늄 흡수효율은 동일농도에서 무기게르마늄에 비하여 유기게르마늄의 흡수효율이 높았다. 그리고 무기 및 유기게르마늄 모두 관주처리에 비하여 엽면처리를 할 경우 과실 내 게르마늄 흡수량이 증대되었고, 특히 유기게르마늄의 경우에는 관주처리에 비하여 과실 내 게르마늄 함량이 엽면처리에서는 약 28배, 관주+엽면처리에서는 약 10 증가되었다.

그리고 게르마늄 처리농도에 따른 전체 과실 내 게르마늄 평균함량 (Fig. 2-39)은 무기게르마늄과 무기게르마늄 모두 처리농도가 높을수록 게르마늄 함량도 증가되었으며, 처리농도별 과실내 게르마늄 함량은 무기게르마늄의 경우 처리농도 5, 10 및 15 mg L<sup>-1</sup>에서 각각 약 0.15, 0.31 및 0.41 mg kg<sup>-1</sup>으로서 처리농도 5 mg L<sup>-1</sup>에 비해 10 및 15 mg L<sup>-1</sup>에서 각각 약 2.1 배 및 2.7배 증가되었고, 유기게르마늄 처리구에서는 각각 약 0.44, 1.29 및 1.84 mg kg<sup>-1</sup>으로서 처리농도 5 mg L<sup>-1</sup>에 비해 10 및 15 mg L<sup>-1</sup>에서 각각 약 2.9배 및 4.2배 증가되었고, 전체적으로 무기게르마늄에 비하여 유기게르마늄 처리구에서 과실 내 흡수효율이 높은 것을 알 수 있었다.

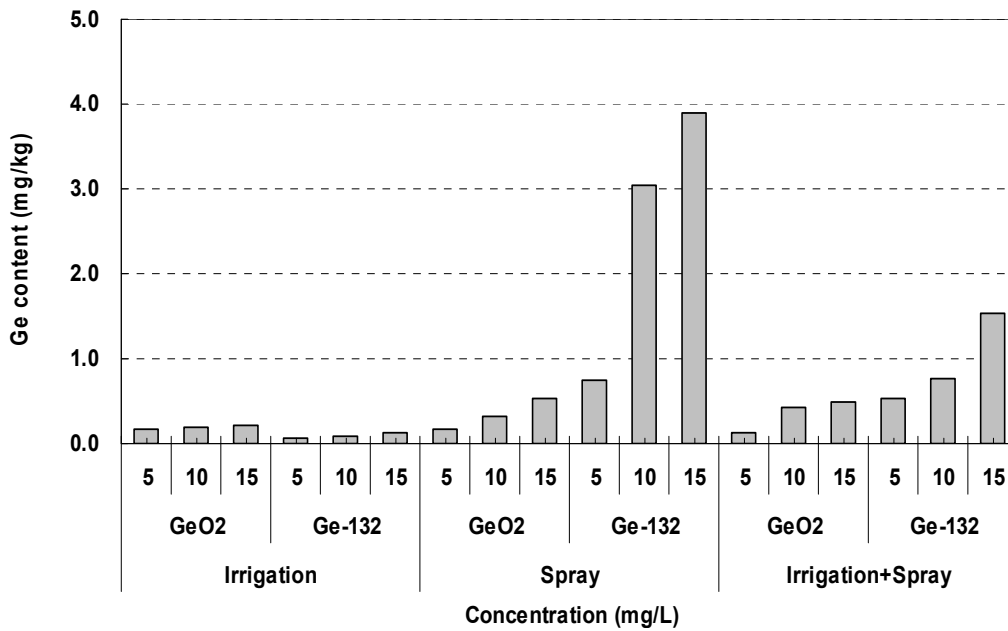


Fig. 3-72. 게르마늄 처리방법에 따른 처리농도별 bottom stage 과실 내 게르마늄 함량

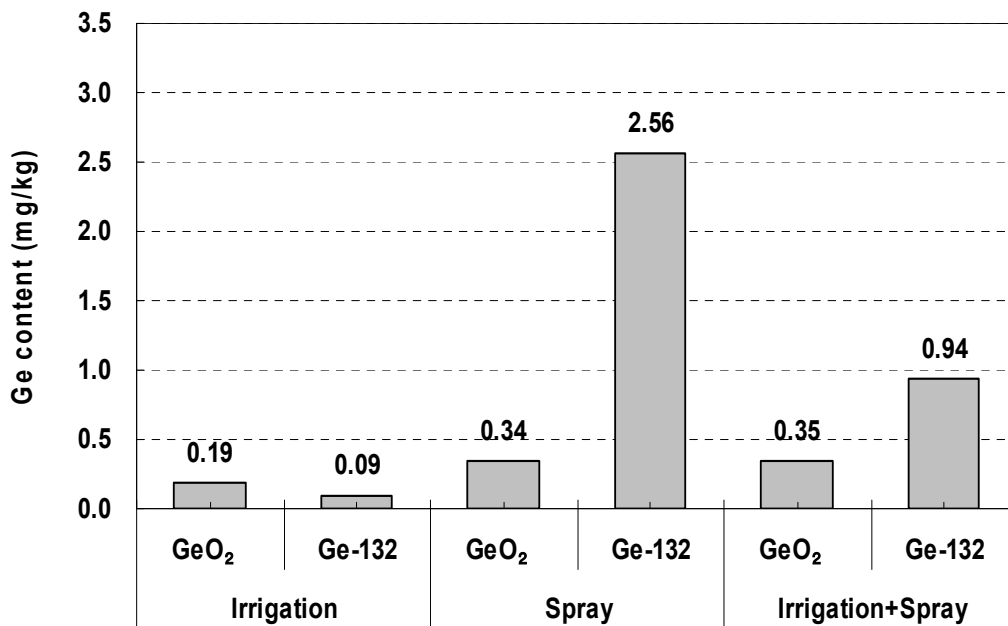


Fig. 3-73. 게르마늄 처리방법에 따른 전체 과실 내 게르마늄 평균함량

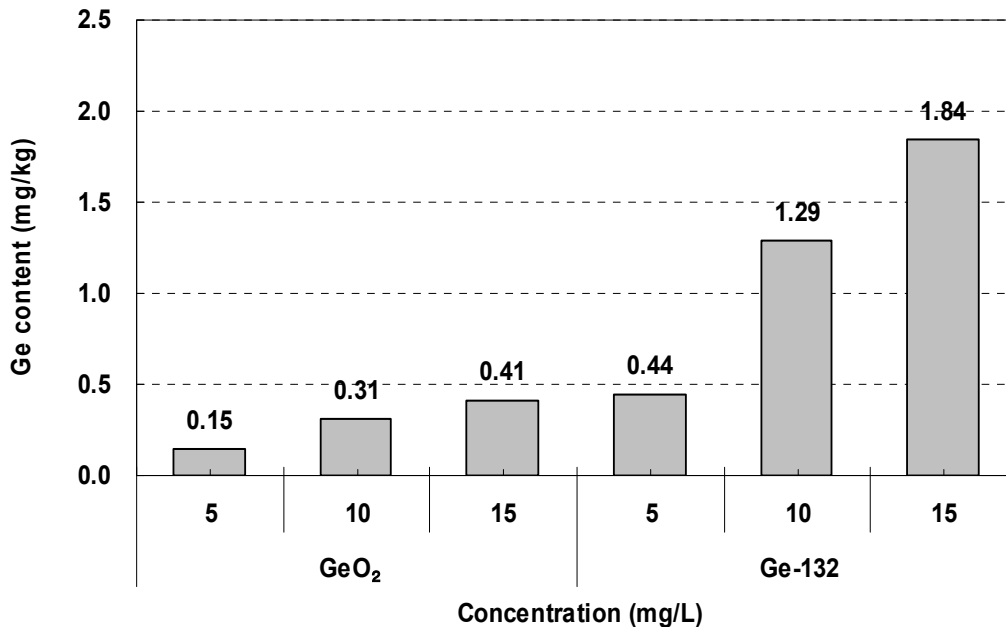


Fig. 3-74. 게르마늄 처리농도에 따른 전체 과실 내 게르마늄 평균함량

6. 고휘배지경 (펄라이트경)을 이용한 게르마늄 처리방법별 최적 게르마늄 처리횟수 구명  
가. 오이재배 및 게르마늄 처리방법

(1) 오이재배방법

고형배지경 (펄라이트경)을 이용한 오이재배시 게르마늄 처리방법별 최적 게르마늄 처리횟수를 구명하기 위하여 고휘배지경 재배방법중의 하나인 펄라이트경을 사용하여 오이 생육특성 및 오이내 게르마늄 흡수특성을 비교 검토하였다. 고휘배지경으로 사용된 베드는 L 500cm × W 80cm × H 40cm인 스티로폼수지 성형 베드로서 베드 하단에 나일론 천을 설치하고, 배지는 perlite를 30cm 깊이로 충진하였다. 공급양액은 베드 상단에 점적호수를 2줄로 설치하고 점적식으로 공급하였다. 양액농도는 정식 후 2주 동안은 일본원예시험장 표준양액의 1/2배액을, 그 이후에는 3/4배액을 순환펌프와 타이머를 이용하여 하루에 3시간 간격으로 5분씩 공급하였으며, 비순환식으로 관리하였다. 오이 육묘는 본 실험 2장인 육묘를 2007년 9월 17일 정식한 후 2007년 10월 30일 까지 47일간 재배하면서 식물체 지상부를 높이별로 bottom stage, middle, top stage로 구분하여 각 stage마다 2개의 과실만 남기고 나머지는 제거하여 재배하면서 정식 47일 후의 식물체 생육 상황 및 과실 내 게르마늄 함량을 조사하였다.

(2) 게르마늄 처리방법

게르마늄 처리는 본 실험 2장인 오이 육묘를 정식 후 18일부터 무기게르마늄 (GeO<sub>2</sub>)과 유기 게르마늄 (Ge-132) 각각을 ① 관주 처리, ② 엽면처리, ③ 관주분할처리의 3가지 방법으로 3일 간격으로 처리하였다. 관주처리는 무기게르마늄 (GeO<sub>2</sub>)과 유기게르마늄 (Ge-132) 모두 각각 10 mg L<sup>-1</sup> 농도로 한 주당 200 ml씩 횟수별 (1회, 2회, 3회, 4회, 5회, 6회) 처리하였고, 엽면처리는 무기게르마늄 (GeO<sub>2</sub>)과 유기게르마늄 (Ge-132) 모두 각각 20 mg L<sup>-1</sup> 농도로 한주당 100



ml (0.2%-Tween 80)씩 스프레이로 관주처리와 같은 횟수로 엽면 살포하였다. 그리고 관주 분할 처리는 무기 및 유기게르마늄을 각각  $5 \text{ mg L}^{-1}$ 인 용액을 1회에 200 ml씩 2회 처리한 시험구,  $2.5 \text{ mg L}^{-1}$ 인 용액을 1회에 200 ml씩 4회 처리한 시험구 및  $1.7 \text{ mg L}^{-1}$ 인 용액을 1회에 200 ml씩 6회 처리한 시험구로 구분하여 시험하였다.

#### 나. 게르마늄 처리횟수별 생육 특성

게르마늄 처리방법에 따른 게르마늄 처리횟수별 지상부 및 지하부의 생육특성을 조사한 결과는 Fig. 3-75, 3-76, 3-77, 3-78, 3-79, 3-80, 3-81에서 보는 바와 같이 지상부 및 지하부의 처리횟수별 생육 특성은 관주처리와 엽면처리 (Fig. 3-76, 3-77, 3-78)의 경우 무기게르마늄 처리에서는 전반적으로 3-4회 처리에서 약간 더 양호한 것으로 보이지만 뚜렷한 차이는 없었고, 유기게르마늄의 경우에는 처리횟수에 따른 생육 차이는 없었다. 그리고 관주분할 처리의 경우 (Fig. 3-79, 3-80, 3-81)에도 처리횟수에 따른 차이는 보이지 않았다.



Fig. 3-75. 게르마늄 처리방법별 최적 처리횟수 구멍을 위한 시험포장 전경

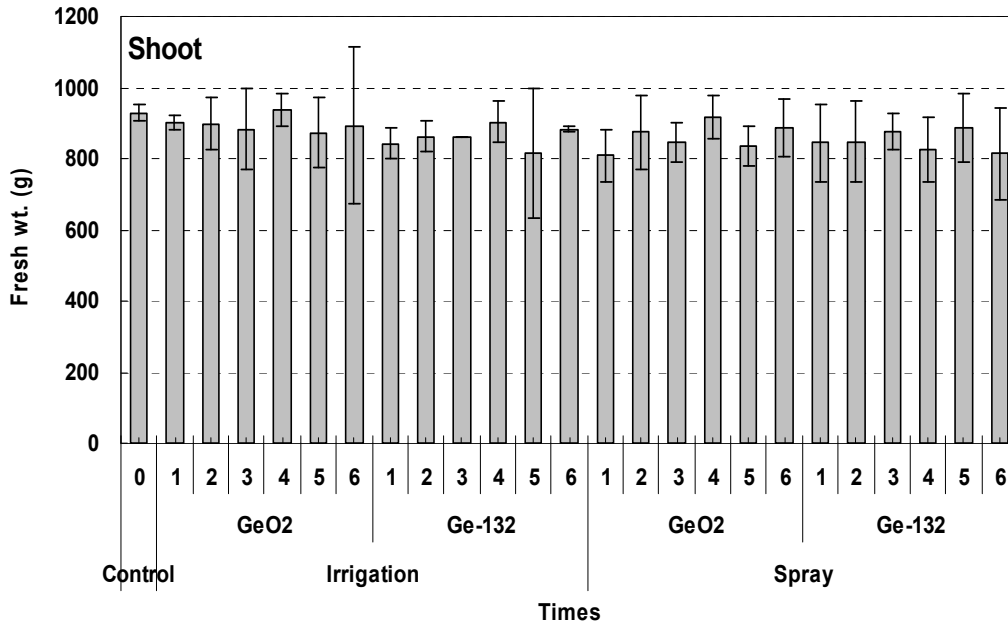


Fig. 3-76. 게르마늄 관주 및 엽면처리에서 처리횟수에 따른 지상부 생체중 변화

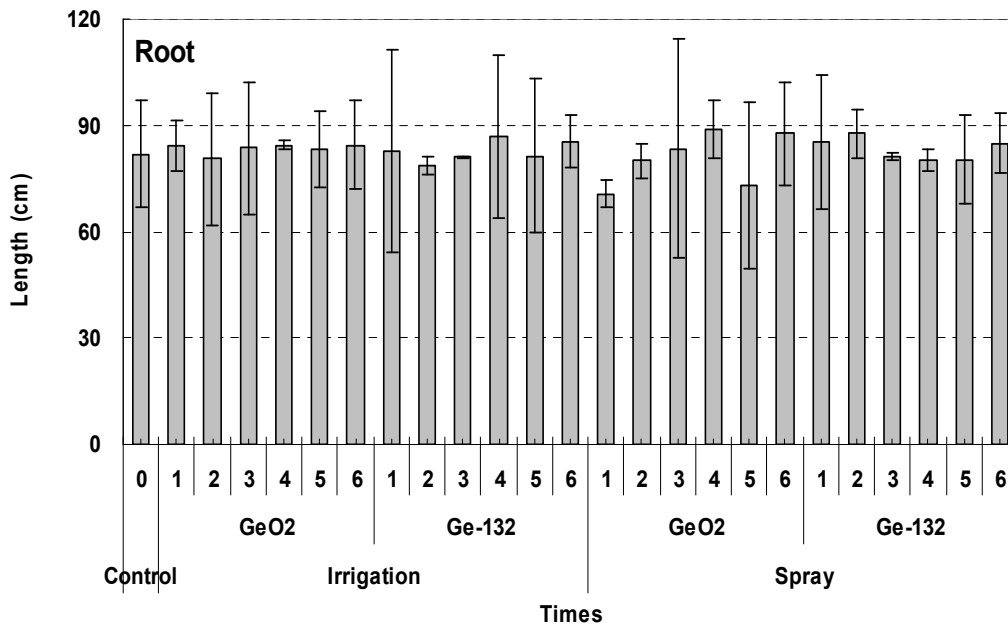


Fig. 3-77. 게르마늄 관주 및 엽면처리에서 처리횟수에 따른 지하부 길이 변화

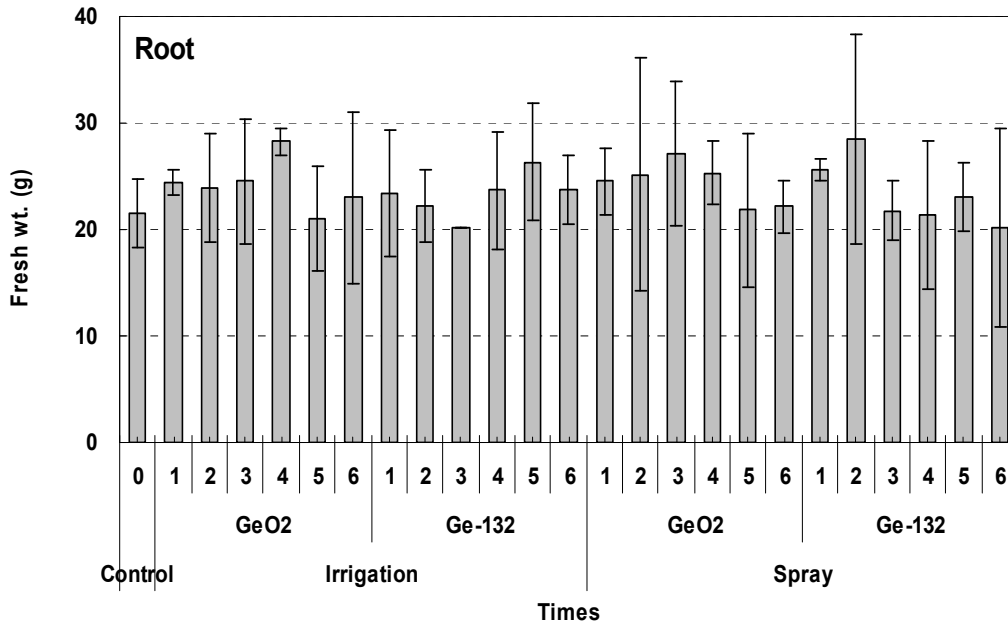


Fig. 3-78. 게르마늄 관주 및 엽면처리에서 처리횟수에 따른 지하부 생체중 변화

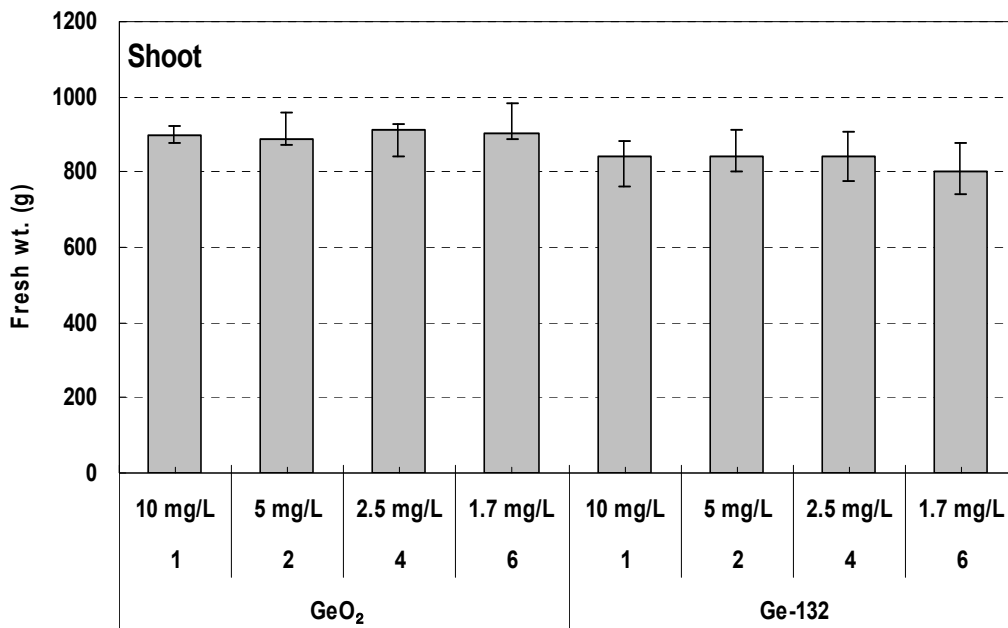


Fig. 3-79. 게르마늄 관주분할처리에서 처리횟수별 지상부 생체중 변화

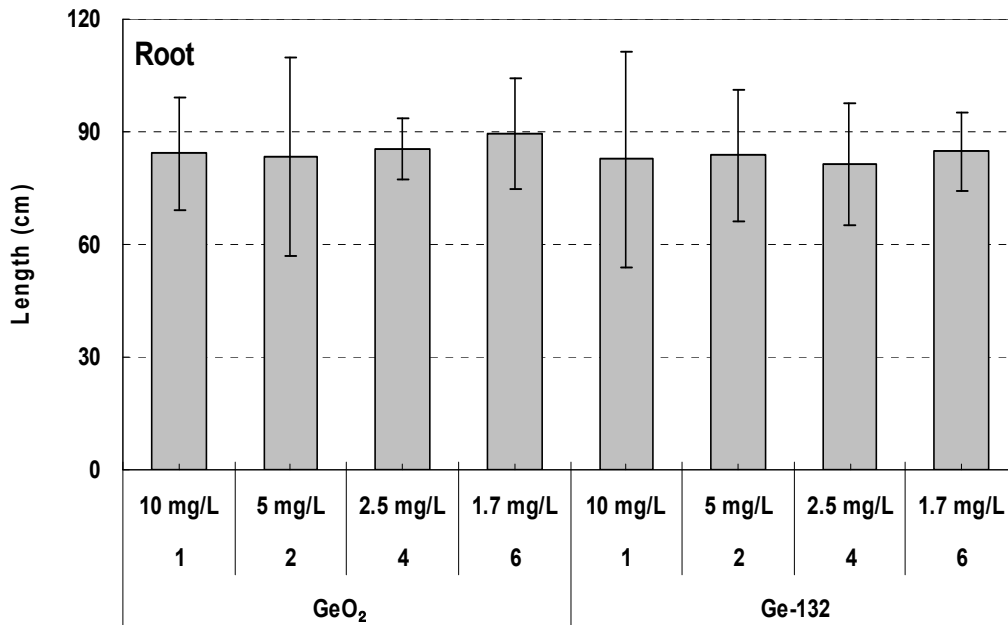


Fig. 3-80. 게르마늄 관주분할처리에서 처리횟수별 지하부 길이 변화

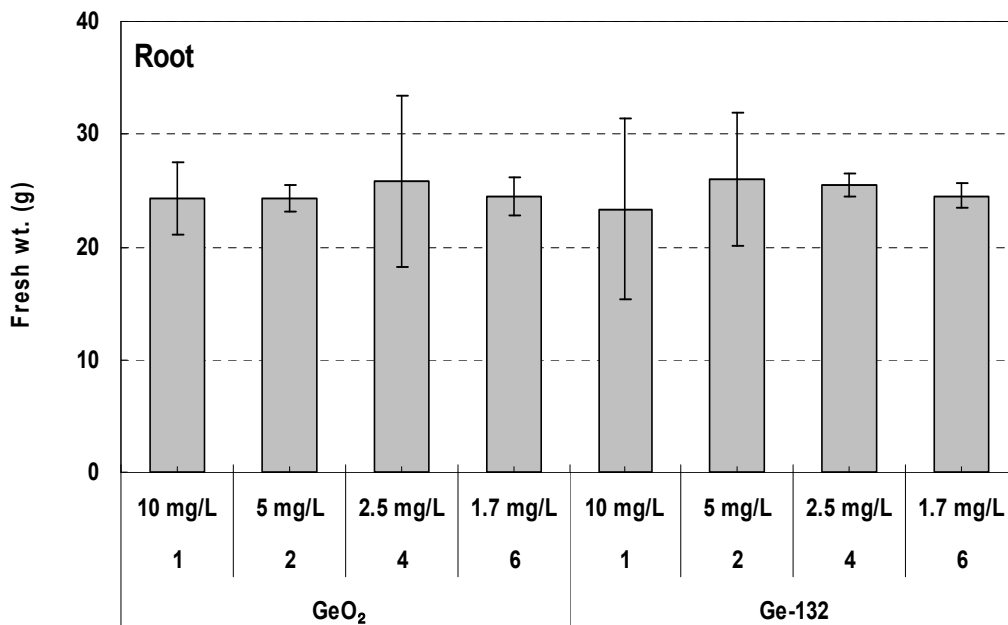


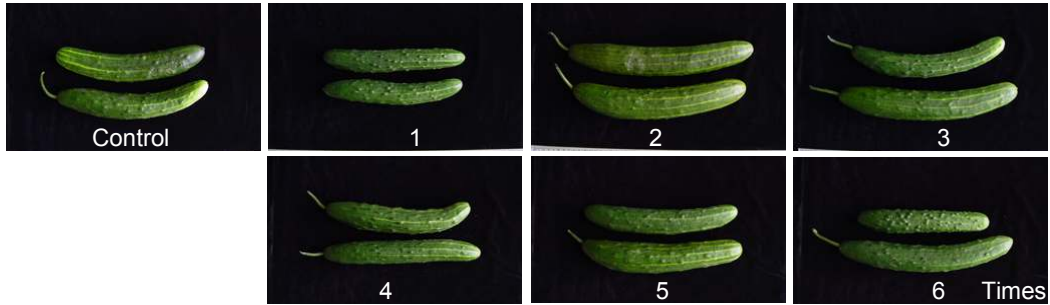
Fig. 3-81. 게르마늄 관주분할처리에서 처리횟수별 지하부 생체중 변화

#### 다. 게르마늄 처리횟수별 과실 (오이) 생장 특성

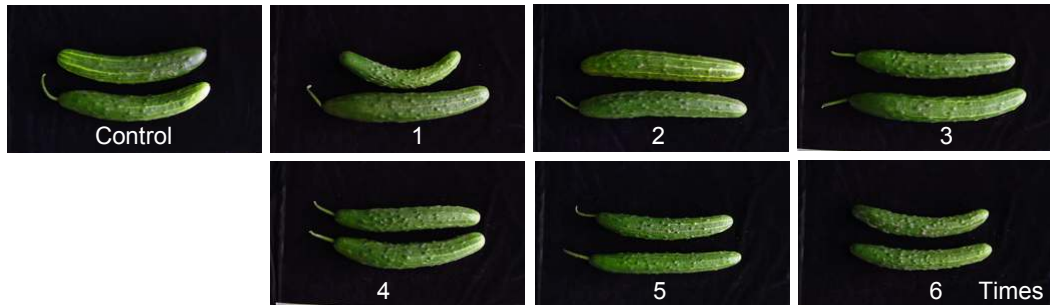
게르마늄 처리방법에 따른 처리횟수별 과실 (오이) 형성 특성을 조사한 결과는 Table 3-26 및 Fig. 3-82, 3-83에서 보는 바와 같이 게르마늄 처리방법별 처리횟수에 따른 뚜렷한 차이는 보이지 않았으며, 전반적으로 무기게르마늄 처리구에서는 3-4회 처리에서 과실 중량과 길이, 둘레 등이 약간 더 증가된 것으로 보였지만 그 차이는 미미하였다.

게르마늄 처리방법별 최적처리횟수는 생육특성과 과실의 수량구성요소 및 과실 내 게르마늄

흡수정도를 종합적으로 비교 검토하여 선정할 것이며, 현재 생육특성과 수량구성요소는 전체적인 조사 데이터를 이용하여 통계 분석 중에 있으며, 과실 내 게르마늄 함량은 현재 분석 중에 있다.



(Irrigation of  $GeO_2$ )



(Irrigation of Ge-132)



(Spray of  $GeO_2$ )



(Spray of Ge-132)

Fig. 3-82. 게르마늄 관주 및 엽면처리에서 처리횟수별 과실 생육 사진

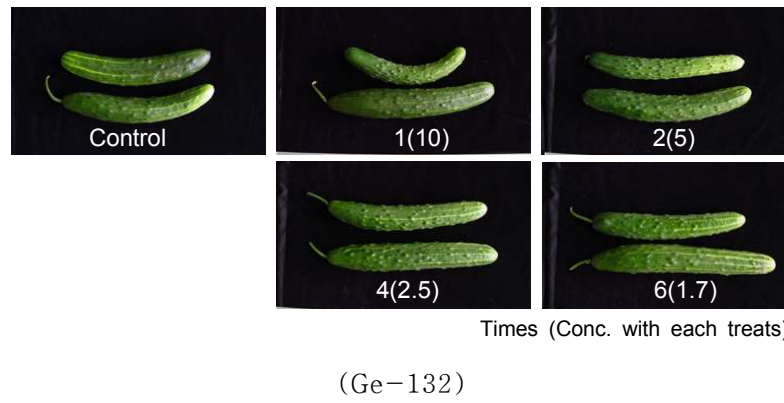
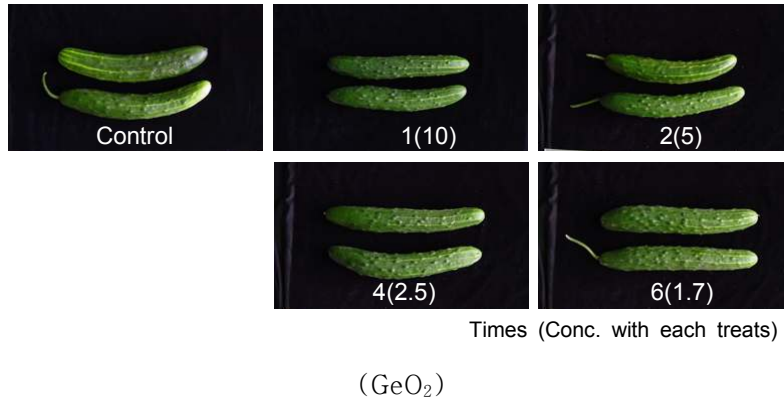


Fig. 3-83. 게르마늄 관주 및 엽면처리에서 게르마늄 종류별 처리횟수별 과실 생육 사진

Table 3-26. 게르마늄 처리방법에 따른 게르마늄 처리횟수별 식물체 성장반응

Treatment (mg L <sup>-1</sup> )		Middle stage			Bottom stage			
		Length (cm)	Weight (g)	Girth (cm)	Length (cm)	Weight (g)	Girth (cm)	
Control	0	11.8	19.8	4.9	28.6	299.4	14.1	
	1	10.4	15.6	3.4	30.5	303.6	17.1	
	2	9.0	22.0	4.0	29.3	257.6	13.5	
	GeO <sub>2</sub>	3	13.2	39.6	5.7	28.2	268.0	15.2
		4	15.6	38.6	5.8	29.6	311.6	15.7
	Irrigation	5	9.8	22.3	4.0	26.5	271.8	12.9
6		9.6	22.7	3.1	25.3	239.9	11.3	
Ge-132		1	11.1	17.0	4.6	28.7	369.4	15.0
		2	12.7	15.8	4.5	32.1	209.7	11.9
		3	15.0	28.1	5.2	38.0	363.4	13.3
		4	17.9	32.9	6.1	32.8	408.6	16.3
	5	10.5	15.0	3.3	30.5	329.8	13.1	
	6	9.7	10.3	3.1	29.0	278.2	13.3	
Spray	GeO <sub>2</sub>	1	10.3	19.6	4.4	31.2	325.4	12.5
		2	10.7	24.5	4.2	30.9	366.7	13.5
		3	15.5	23.3	5.4	27.9	399.8	13.7
		4	19.9	25.7	3.1	26.1	330.9	12.2
		5	13.2	19.0	4.2	25.5	200.1	11.8
		6	12.8	23.2	4.4	23.1	167.4	11.3
Irrigation division	Ge-132	1	13.9	28.1	5.6	29.3	286.8	11.3
		2	18.3	29.0	5.2	27.7	269.4	11.7
		3	10.0	35.2	4.4	25.5	327.4	12.9
		4	17.1	34.5	3.0	26.1	215.2	12.2
		5	14.9	32.6	6.3	25.7	182.8	11.3
		6	10.1	19.1	4.4	27.0	228.9	12.6
Irrigation division	GeO <sub>2</sub>	2	11.8	22.8	4.6	32.1	295.5	15.0
		4	10.9	19.6	4.5	30.6	341.3	14.3
		6	6.8	14.9	2.8	30.6	328.7	13.6
	Ge-132	2	8.7	11.9	3.9	31.1	354.8	14.3
		4	7.5	18.2	4.2	30.1	364.9	14.5
		6	10.7	15.1	3.7	30.7	381.3	15.4

## 7. 연구결과 요약

오이 종자 발아에 대한 게르마늄의 독성발생 농도범위를 구명하기 위하여 게르마늄 처리 농도별 발아율, 발아종자식물의 생육 특성 및 게르마늄 흡수 정도를 조사하였다. 게르마늄처리에 따른 오이 종자의 발아특성은 전반적으로 유기게르마늄에 비하여 무기게르마늄 처리에서 약간의 초기발아 저해현상이 보였으나 전체적으로는 종자발아에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 발아된 오이 유묘의 성장반응은 유기게르마늄에 비해 무기게르마늄에서 생육저해를

크게 받는 것으로 나타났다. 게르마늄 처리 농도별 성장반응은 전체적으로 무기게르마늄의 경우 처리농도  $5 \text{ mg L}^{-1}$  까지 유기게르마늄의 경우에는 처리농도  $10 \text{ mg L}^{-1}$ 까지는 성장반응에 대한 저해 현상이 나타나지 않았다. 따라서 게르마늄이 오이종자 발아 자체에 미치는 영향은 거의 없었지만 발아 후 종자 생육에는 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 오이 종자발아 단계에서의 게르마늄 적정 처리농도는 무기게르마늄의 경우는  $5 \text{ mg L}^{-1}$ 이내, 유기게르마늄의 경우에는  $10 \text{ mg L}^{-1}$  이내가 적당할 것으로 판단되었다.

오이 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위 및 최적 게르마늄 처리 농도를 구명하기 위하여 게르마늄 처리 농도별 생육특성, 식물체 내 게르마늄 흡수특성, 양액 내 게르마늄 및 일 반성분 함량 변화 등을 조사하였다. 무기게르마늄과 유기게르마늄 처리농도별 생육은 무기게르 마늄의 경우 대조구에 비하여 전체적으로 생체중은 약 23%, 길이는 약 31% 감소되었으며, 유 기게르마늄 처리구에서는 생체중은 약 7% 정도 감소되어 대조구와 별 차이가 없었으며 길이는 약 20% 정도 감소되었다. 게르마늄 농도에 따른 오이의 생육특성은 전체적으로 유기게르마늄 처리에 비하여 무기게르마늄 처리구에서는 매우 큰 생육저해 현상을 보였으며, 생체중의 경우 무기게르마늄 처리에서는 대조구에 비하여 지상부는 약 40%, 지하부는 약 42%가 감소되었으 며, 유기게르마늄 처리에서는 각각 약 4% 및 25%가 감소되었고, 전체 길이는 무기게르마늄 처 리에서는 지상부가 약 21%, 지하부가 약 11% 감소되었으며, 유기게르마늄 처리구에서는 오히 려 대조구에 비하여 지상부, 지하부 모두 식물체 길이가 약간 증가되었다. 게르마늄 처리 유무 에 따른 식물체내 chlorophyll -a 및 b 함량은 유기게르마늄의 경우에는 특별한 경향없이 대조 구와 유사하였지만 무기게르마늄 처리에서는 chlorophyll -b 함량은 별 차이가 없었으나 chlorophyll -a 함량은 농도가 높을수록 무처리에 비하여 크게 감소되었다.

식물체 부위별 게르마늄 분포 정도는 무기게르마늄의 경우에는 전체적으로 Stem (43.3%) > Leaf (34.2%) > Root (22.5%) 순으로 뿌리에 비하여 줄기와 잎에 매우 높게 분포되어 있었으 며, 유기게르마늄은 Root (89.6%)  $\gg$  Stem (7.7%) > Leaf (2.7%)순으로 거의 대부분이 뿌리에 분포되어 있었다. 식물체내 전체 게르마늄 함량은 무기게르마늄 처리구에서 유기게르마늄 처리 구에 비하여 약 2.2배 정도 높았으며, 식물체 부위별 흡수함량은 잎과 줄기에서는 무기게르마 늄이 유기게르마늄에 비하여 각각 약 27.0배 및 12.2배 높았고 뿌리에서는 유기게르마늄 처리 구에서 무기게르마늄 처리구에 비하여 약 1.9배 높은 것으로 나타났다. 초기 용액 내 투입된 게르마늄 중 식물체내로 흡수된 량은 무기게르마늄 처리구의 경우 처리농도  $1 \text{ mg L}^{-1}$  (투입 게르마늄 함량  $398 \text{ ug}$ )에서는 약 14.4%에 해당하는 약  $57.6 \text{ ug}$  이 식물체내로 흡수되었으며 식물체 부위별 흡수율 분포는 잎 (65.6%)  $\gg$  줄기 (21.9%) > 뿌리 (12.5%)순으로 거의 대부분 이 잎과 줄기에 분포되어 있었고, 유기게르마늄 처리구의 경우에는 처리농도  $1 \text{ mg L}^{-1}$  (투입 게르마늄 함량  $389 \text{ ug}$ )에서는 약 2.8%에 해당하는 약  $10.8 \text{ ug}$  이 식물체내로 흡수되어 무기게 르마늄에 비하여 식물체 흡수효율이 매우 낮았으며 식물체 부위별 흡수율 분포는 뿌리 (79.3%)  $\gg$  잎 (12.4%) > 뿌리 (8.3%)로 무기게르마늄과는 달리 뿌리에 대부분이 흡수되어 있 었다.



초기 용액 내 투입된 전체 게르마늄 (무기게르마늄 약 24,214 ug, 유기게르마늄 약 24,343 ug)중 식물체내로 흡수된 게르마늄 총량은 무기게르마늄 처리구가 약 11.4%에 해당하는 약 2,754.8 ug이 흡수되었고 유기게르마늄 처리구에서 약 1.8%에 해당하는 약 430.5 ug이 흡수되어 유기게르마늄에 비하여 무기게르마늄의 흡수량이 약 6.4배 정도 높았다. 전체 흡수된 게르마늄의 식물체 부위별 게르마늄 총 흡수량은 무기게르마늄 처리에서는 잎에 약 1,937 ug, 줄기에 약 658 ug, 뿌리에 약 160 ug으로서 잎에 가장 많이 흡수되어 있었으며, 유기게르마늄 처리구에서는 잎에 약 119 ug, 줄기에 약 253 ug, 뿌리에 약 431 ug으로 무기게르마늄과는 달리 뿌리에 가장 많은 양이 흡수되어 있었다. 무기게르마늄 처리에서는 초기 게르마늄 투입량의 약 88.6%가 용액 중에 잔류되어 있었고 약 11.4%가 식물체내로 흡수되었고, 유기게르마늄 처리에서는 초기 게르마늄 투입량의 약 98.2%가 용액 중에 잔류되어 있었고 약 1.8%만이 식물체내로 흡수되어 무기게르마늄에 비하여 식물체내 흡수효율이 매우 낮았다.

비고형배지경을 이용한 게르마늄 최적처리방법을 구명하기 위하여 게르마늄을 양액 내 관주처리, 엽면처리 및 양액 내 관주처리+엽면처리의 3가지 방법에 따른 식물체 성장반응특성과 게르마늄 흡수특성을 비교 검토하였다. 무기게르마늄 처리구에서는 엽면처리의 경우에는 전체적으로 생육저해현상이 크게 나타나지 않았으나 양액 내 관주처리와 양액 내 관주처리+엽면처리에서는 지상부 및 지하부의 생육이 크게 저해되었으며 지상부 및 지하부의 생체중이 양액 내 관주처리에서 각각 약 83% 및 81%, 관주처리+엽면처리에서는 각각 약 71% 및 76% 감소되었다. 유기게르마늄 처리구의 경우에는 전체적으로 처리방법에 따른 생육 저해현상이 거의 나타나지 않았다. 게르마늄 처리방법에 따른 과실의 특성은 전체적으로 무기게르마늄 처리구의 경우 엽면처리에서는 큰 차이 없이 대조구와 유사한 생육 특성을 보였으나 관주처리와 관주+엽면처리에서는 과실의 길이, 중량, 둘레가 크게 감소되었으며 과실생장 감소정도는 관주처리 > 관주+엽면처리 >> 엽면처리 순이었다. 그리고 유기게르마늄 처리구의 경우에는 3가지 처리방법 모두에서 과실의 길이, 중량, 둘레 등이 대조구와 비슷하거나 약간 증가되는 경향이었다.

식물체내 게르마늄 분포 및 이동특성을 구명하기 위하여 게르마늄 처리방법에 따른 오이 식물체와 과실을 부위별로 세분화하여 부위별 게르마늄 분포와 이동특성을 비교 검토하였다. 게르마늄 처리방법에 따른 식물체 부위별 게르마늄 함량은 게르마늄 처리방법에 따라 큰 차이가 났으며, 게르마늄 종류에 따라서도 차이가 있었다. 처리방법별 게르마늄 흡수 농도 분포는 전체적으로 식물체 부위별로도 큰 차이가 있었으며 흡수농도 분포정도는 유기게르마늄 처리구에 비하여 무기게르마늄 처리구에서 훨씬 높았다. 양액내 관주처리의 경우 무기게르마늄의 경우에는 흡수된 게르마늄의 약 94%가 지상부인 과실, 줄기 잎 등에 분포되어 있었고 지하부인 뿌리에는 약 5.9%만이 존재하였다. 유기게르마늄의 경우에는 무게게르마늄과는 반대로 97%가 지하부인 뿌리에 존재하였고 2.7%만이 지상부인 과실, 줄기, 잎 등에 분포하였다. 엽면처리에서는 무기게르마늄의 경우 지상부에 약 61%, 지하부인 뿌리에 약 39%로서 지상부인 잎, 줄기 등에 존재하는 비율이 낮아지고 지하부인 뿌리에 존재하는 비율이 높아졌다. 유기게르마늄의 경우에는 지상부에 약 62%, 지하부에 약 38%로서 양액내 처리에 비하여 지상부에 존재하는 비

율이 훨씬 높았다. 그리고 관주처리와 엽면처리를 동시에 하였을 경우에는 양액내 관주처리에 서와 거의 유사한 경향을 나타내었으며, 무기게르마늄 처리의 경우 지하부인 뿌리에 존재하는 비율이 약간 높아졌으나 유기게르마늄 처리구에서는 별 차이가 없었다.

식물체 지상부 stage별 게르마늄 함량은 무기게르마늄과 유기게르마늄 모두 top stage > middle stage > bottom stage 순으로 분포되어 있었으며, 엽면처리의 경우에는 무기 및 유기 게르마늄 모두 middle stage > bottom stage > top stage 순으로서 양액내 관주처리와는 다른 분포양상을 보였다. 지상부 각 stage를 과실 (fruit), 잎 (leaf), 잎줄기 (petiole), 줄기 (stem)로 구분한 부위별 게르마늄 흡수 분포농도는 양액내 관주처리의 경우 무기게르마늄처리에서는 잎 줄기 (36.4%) > 잎 (33.1%) > 줄기 (28.5%) ≫ 과실 (2.1%) 순으로서 과실인 오이에는 분포함량이 매우 낮았으며, 유기게르마늄 처리에서는 잎줄기 (37.1%) > 잎 (27.7%) > 잎 (18.0%) ≥ 과실 (17.2%)로 무기게르마늄에 비해 유기게르마늄 처리에서 과실내 분포함량이 높았다. 엽면 처리에서는 관주처리와 관주+엽면처리에 비하여 무기 및 유기게르마늄 처리구 모두 잎에 분포되어 있는 함량이 월등히 높았다. 관주+엽면처리에서는 무기게르마늄의 경우 관주처리에 비하여 과실내 게르마늄 분포함량이 증가되었으며, 무기 및 유기게르마늄 처리구 모두 잎의 게르마늄 분포함량이 크게 감소하고 엽면처리에 비하여 줄기내 게르마늄 함량분포가 크게 증가되었다.

식물체내에 흡수된 전체 게르마늄의 지하부인 뿌리와 지상부에 흡수된 양은 처리방법과 게르마늄 종류에 따라서 매우 다른 양상을 나타냈었으며 관주처리의 경우 식물체내 흡수된 게르마늄 54.5 mg중 지상부에 약 53.9 mg, 지하부인 뿌리에 약 0.27 mg이 분포되어 거의 대부분이 지상부로 이동하였으며, 유기게르마늄의 경우에는 전체 흡수된 게르마늄 약 27 mg중 지상부에 약 9.2 mg, 지하부에 약 17.8 mg이 흡수되어 무기게르마늄과는 다른 흡수양상을 보였다. 엽면 처리에서는 무기게르마늄의 경우에는 식물체내 흡수된 게르마늄 약 3.6 mg중 지상부에 약 3.5 mg, 지하부에 약 0.1 mg이 흡수되어 관주처리와 유사한 양상을 보였지만, 유기게르마늄의 경우에는 관주처리에서와는 달리 식물체내 흡수된 전체 게르마늄 약 3.13 mg중 지상부에 약 3.05 mg, 지하부에 약 0.08 mg이 흡수되어 거의 대부분이 지상부에 흡수되어 있는 것으로 나타나 유기게르마늄은 식물체내에서 이동이 잘 안되는 것으로 생각되었다. 그리고 엽면+관주처리에서는 무기게르마늄 및 유기게르마늄 처리 모두에서 관주처리와 유사한 경향을 보였다.

오이의 식용 부위인 과실의 부위별 게르마늄 분포함량은

전체적으로 모든 처리구에서 꼭지에 가장 높은 농도로 분포되어 있었으며, 과실인 오이 길이에 따라서는 무기게르마늄의 경우에는 모든 처리방법에서 전반적으로 꼭지와 가까운 part I 에 가장 높은 농도로 분포되어 있었고, 유기게르마늄의 경우에는 전체적으로 과실 길이별로 뚜렷한 경향 없이 비교적 일정한 농도로 고르게 분포되어 있었다. 그리고 과실의 식용 부위인 오이 껍질 (rind), 과육 (pulp), 오이 속 (seeds)의 게르마늄 분포함량은 게르마늄 처리방법에 따른 차이는 없었으며, 각 부위별 게르마늄 분포함량은 전체적으로 모든 처리구에서 껍질 (52.7-37.1%) > 과육 (36.6-31.5%) > 오이 속 (26.7-15.7%) 순으로 과실의 부위에 따라서도 분

포 정도에 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

용액내 투입된 전체 게르마늄 중 식물체내로 흡수된 게르마늄 흡수율은 무기게르마늄의 경우 관주처리에서 약 27.3%, 엽면처리에서는 약 17.9%, 관주+엽면처리에서 약 37.2%로서 전체 이용효율은 관주처리와 엽면처리를 병행하였을 경우에 더 높았으며, 유기게르마늄 처리구의 경우에는 관주처리에서 약 13.6%, 엽면처리에서 약 15.8%, 엽면+관주처리에서 약 14.7%로서 엽면처리에 의해 약간 흡수효율이 증가되는 경향이 보였으나 큰 차이는 없었다.

따라서 게르마늄 처리방법에 따른 식물체 성장반응과 식물체내 게르마늄 분포농도, 흡수량 및 흡수율 등의 결과들을 종합적으로 비교 검토해 볼 때 무기게르마늄의 경우에는 관주처리와 엽면처리를 동시에 하는 방법이 더 효과적이었으며, 유기게르마늄의 경우에는 처리방법에 따른 식물체 전체 이용효율에는 큰 차이가 없었으나 엽면처리에서 흡수된 게르마늄의 지상부로의 이동효율이 높았고 또한 과실인 오이 내 흡수효율이 관주처리와 관주+엽면처리에 비하여 매우 높았으므로 엽면처리가 더 효과적일 것으로 판단되었다.

고형배지경 (필라이트경)을 이용한 오이재배시 게르마늄 최적처리방법과 최적 처리농도를 구명하기 위하여 고형배지경 재배방법중의 하나인 필라이트경을 사용하여 오이 생육특성 및 오이내 게르마늄 흡수특성을 비교 검토하였다. 게르마늄 처리방법 및 처리농도에 따른 전반적인 성장반응은 무기 및 유기게르마늄 처리구 모두 게르마늄 처리방법과 처리농도에 따른 뚜렷한 차이가 나타나지 않았으나 생체중은 처리방법과 처리농도에 따라 약간의 차이가 있었다. 전체적으로 관주처리에 비하여 엽면처리에서 생육감소가 높아 소액 담액경을 이용한 연구결과와는 약간 다른 경향을 보였으며, 게르마늄 처리방법에 따른 생육 감소 정도는 엽면처리 > 관주+엽면처리 > 관주처리 순으로서 생육적인 측면만을 고려할 때 게르마늄 최적처리방법은 유기게르마늄의 경우에는 세가지 처리방법 모두 별 차이가 없었으나 무기게르마늄의 경우에는 관주처리가 가장 양호한 것으로 나타났다. 필라이트를 이용한 고형배지경의 오이재배에서는 오이내 게르마늄 흡수효율은 동일농도에서 무기게르마늄에 비하여 유기게르마늄의 흡수효율이 높았다. 그리고 무기 및 유기게르마늄 모두 관주처리에 비하여 엽면처리를 할 경우 과실 내 게르마늄 흡수량이 증대되었고, 특히 유기게르마늄의 경우에는 관주처리에 비하여 과실 내 게르마늄 함량이 엽면처리에서는 약 28배, 관주+엽면처리에서는 약 10배 증가되었다. 게르마늄 처리방법에 따른 지상부 및 지하부의 게르마늄 처리횟수별 생육 특성은 관주처리와 엽면처리 의 경우 무기게르마늄 처리에서는 전반적으로 3-4회 처리에서 약간 더 양호한 것으로 보이지만 뚜렷한 차이는 없었고, 유기게르마늄의 경우에는 처리횟수에 따른 생육 차이는 없었다. 그리고 관주분할 처리의 경우 에도 처리횟수에 따른 차이는 보이지 않았다. 게르마늄 처리방법에 따른 처리횟수별 과실 (오이) 형성 특성은 게르마늄 처리방법별 처리횟수에 따른 뚜렷한 차이는 보이지 않았으며, 전반적으로 무기게르마늄 처리구에서는 3-4회 처리에서 과실 중량과 길이, 둘레 등이 약간 더 증가된 것으로 보였지만 그 차이는 미미하였다.

#### IV. 게르마늄함유 기능성 갓 수경재배 기술 개발

##### 1. 공시 재료

###### 가. 공시 갓 종자

공시 갓은 다끼이종묘 (주)의 아카오바타카나 갓 (Leaf mustard : *Brasica juncea* C.)를 사용하였으며, 갓 종자를 육묘용 포트에 파종하여 시험목적에 따라 일정 기간 키운 후 사용하였다.

###### 나. 공시 게르마늄

공시 게르마늄은 무기게르마늄 [ $\text{GeO}_2$ , Sigma]과 유기게르마늄 [Ge-132, carboxyethyl germanium sesquioxide  $3(\text{GeCH}_2\text{COOH})_2$ , Sigma] 2종류를 각각  $5,000 \text{ mg L}^{-1}$ 의 stock solution 을 조제하여 시험 목적에 따라 일정농도로 희석 조제하여 사용하였다.

###### 다. 공시 양액

공시 양액은 독성발생 농도범위 등을 구명하기 위한 단기재배와 하우스와 온실에서의 장기 재배용 양액은 일본원예시험장 표준 양액을 1/2배액으로 사용하였다.

Table 3-27. 공시양액 조성

Fertilizer	Concentration ( $\text{mg L}^{-1}$ )	
	1.0×	0.5×
$\text{KNO}_3$	810	405
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	950	475
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	500	250
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	155	77.5
Fe-EDTA	20	20
$\text{H}_3\text{BO}_3$	3	3
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	2	2
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.22	0.22
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.05	0.05
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.02	0.02
EC ( $\text{dS m}^{-1}$ )	2.2	1.7
pH	6.2	6.8

## 2. 게르마늄 및 일반성분 분석

식물체 및 배양 양액 내 게르마늄과 일반성분 분석은 [제1절]에서 구명한 최적 분석조건을 토대로 건조시료 0.2 g을 teflon bomb에 넣은 후 HNO<sub>3</sub> (Merk, Suprapur) 5 ml을 첨가하여 4시간 방치한 후 50°C로 over night시키고 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5 ml (Merk, Suprapur)을 첨가하여 80°C로 2시간 가열하여 유기물을 완전히 분해시켜 3차 증류수를 가하여 10 ml로 정용하여 ICP-MS와 ICP로 분석하였다.

## 3. 갓 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위 구명

갓 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위 및 최적 게르마늄 처리 농도를 구명하기 위하여 게르마늄 처리 농도별 생육특성, 식물체 내 게르마늄 흡수특성, 양액 내 게르마늄 및 일반성분 함량 변화 등을 조사하였다.

갓 정식은 원형으로 된 유리칼럼 (24×200 mm tube)에 무기게르마늄 (GeO<sub>2</sub>)과 유기게르마늄 (Ge-132) 각각을 농도별 (0, 2.5, 5, 10, 25, 50, 75, 100 mg L<sup>-1</sup>)로 조정된 1/2배액 양액 100 ml을 각각의 칼럼에 주입하여 파종 12일 된 갓 육묘를 정식하였다. 뿌리 부분의 빛을 차단하기 위하여 칼럼을 알루미늄 호일로 감싼 후 식물생장상 (23 ± 0.5°C)에서 12일간 생육하였다. 생육기간 동안 증산과 증발에 의한 수분 손실량은 2일 간격으로 3차 증류수로 총 양액 부피가 100 ml이 되도록 조정하였다.

생육 조사는 정식 12일 후의 표본식물 10개체를 선별하여 길이, 생체중을 조사하였고 전체 뿌리길이, 뿌리직경 및 뿌리 표면적을 조사하였다. 뿌리 염색은 0.05% Trypan blue (lactic acid : glycerol : DW= 1 : 2 : 2)에 침지시켜 실온에서 over night 시킨 후 2-3회 물로 씻어내어 WinRhizo<sup>®</sup> (Regent Instruments Inc. Canada) system을 사용하여 측정하였고, 식물체 및 배양 양액 내 게르마늄과 일반성분은 ICP-MS와 ICP로 분석하였다.

### 가. 갓 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위

갓 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위 및 최적 게르마늄 처리 농도를 구명하기 위하여 무기게르마늄 (GeO<sub>2</sub>)과 유기게르마늄 (Ge-132)을 농도별 (0, 2.5, 5, 10, 25, 50, 75, 100 mg L<sup>-1</sup>)로 처리한 1/2배액 양액 100 ml이 주입된 유리 칼럼에 갓 육묘를 정식하여 정식 12일 후의 식물체내 생육특성, 식물체내 게르마늄 흡수특성, 양액내 게르마늄 및 일반성분 함량 변화 등을 조사하였다.

#### (1) 성장반응특성

게르마늄 농도에 따른 갓의 생육특성을 조사한 결과는 Fig. 3-84, 3-85, 3-86, 3-87, 3-88, 3-89, 3-90 및 Table 3-28에서 보는바와 같다. 게르마늄 처리에 따른 갓의 생육저해 정도는 전체적으로 유기 및 무기 게르마늄 처리구에서 비슷한 경향을 보였다. 무기 및 유기게르마늄 모두 10 mg L<sup>-1</sup>까지는 생육저해 현상이 거의 없었으나 25 mg L<sup>-1</sup> 이상부터는 심한 생육저해

현상을 보였다. 게르마늄 처리에 의한 생육저해 현상은 무기 및 유기게르마늄 모두 처리농도 25 mg L<sup>-1</sup> 이상 처리구에서 2일 후부터 잎의 황백화 현상이 나타나고, 잎이 시드는 현상 등의 외형적인 저해현상이 나타났으며 특히 75 및 100 mg L<sup>-1</sup> 처리에서는 본 잎 생성이 거의 되지 않았으며 처리 6-7일 이후부터 고사되었다 (Fig. 3-84, 3-85, 3-86). 지하부의 경우에는 무기 및 유기 게르마늄 모두 농도가 증가할수록 성장반응이 저해되는 경향이었으며, 특히 무기게르마늄의 경우에 뿌리털이 짧고 두꺼워지는 경향이었다.



Fig. 3-84. 게르마늄 처리농도별 갖의 초기생육 비교

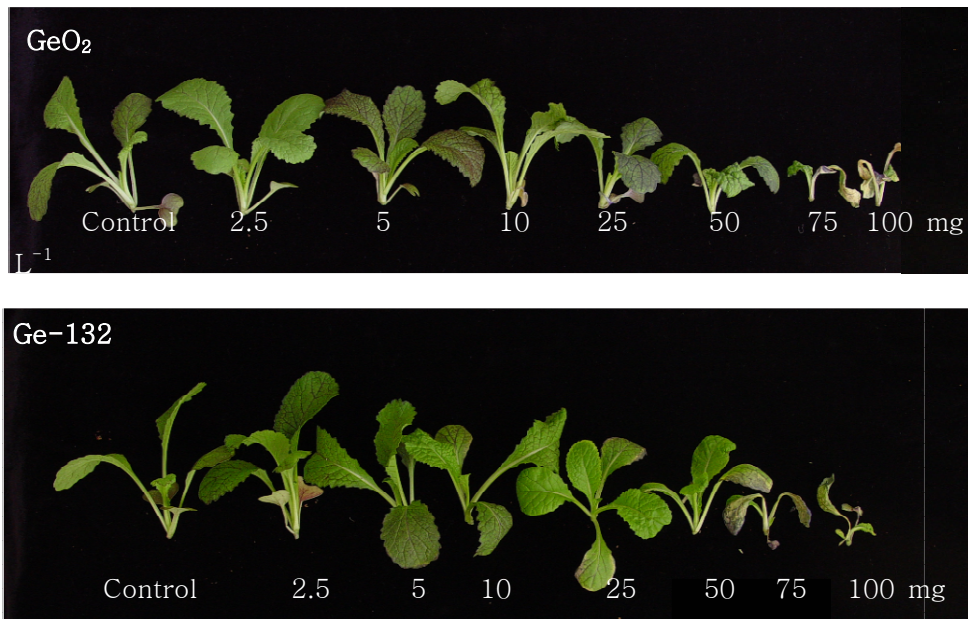


Fig. 3-85. 게르마늄 처리농도별 지상부 생육 비교

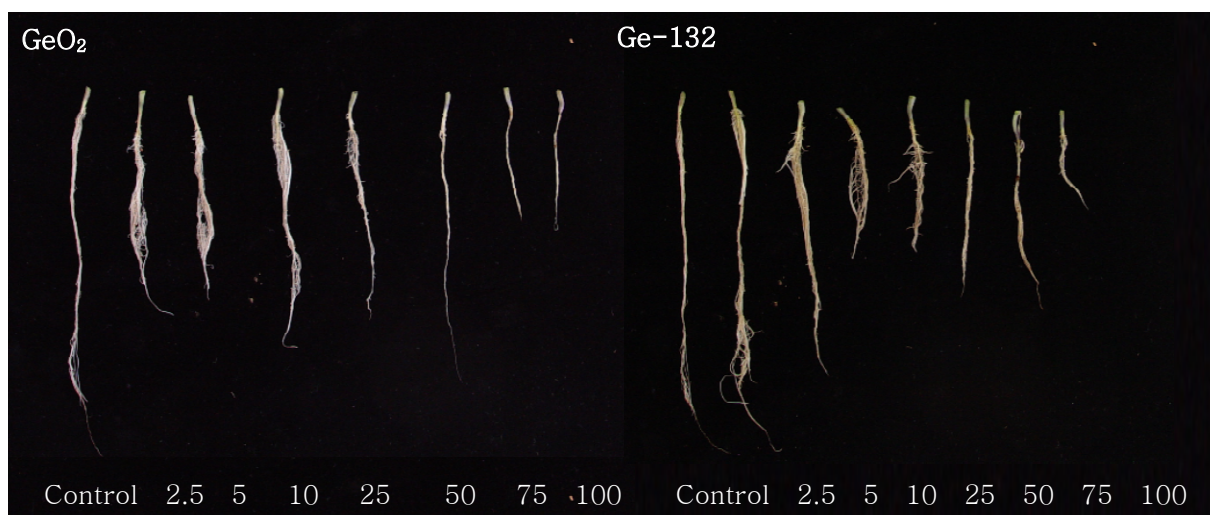


Fig. 3-86. 게르마늄 처리농도별 지하부 생육 비교

지상부 생체중 (Fig. 3-87)은 무기 게르마늄 처리구에서는 2.5 mg L<sup>-1</sup>에서는 대조구에 비해 약간 증가되었고 5 및 10 mg L<sup>-1</sup>에서는 대조구와 유사한 생체중을 보였고 25 mg L<sup>-1</sup>부터는 크게 감소되었다. 유기 게르마늄 처리구의 지상부 생체중은 2.5-10 mg L<sup>-1</sup>에서는 대조구에 비해 약간 증가되었으며 25 mg L<sup>-1</sup>부터 감소하였으나 무기게르마늄 처리구에 비하여 감소 정도가 낮았다. 이러한 현상은 지하부의 생체중을 조사한 결과와 지상부 및 지하부의 식물체 길이를 조사한 결과 (Fig. 3-88)에서도 유사하게 나타났다.

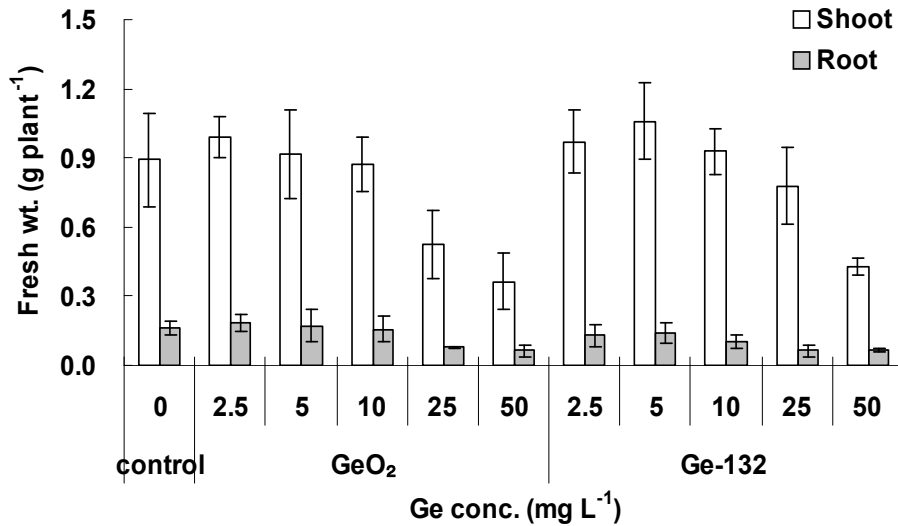


Fig. 3-87. 게르마늄 처리농도별 생체중 비교

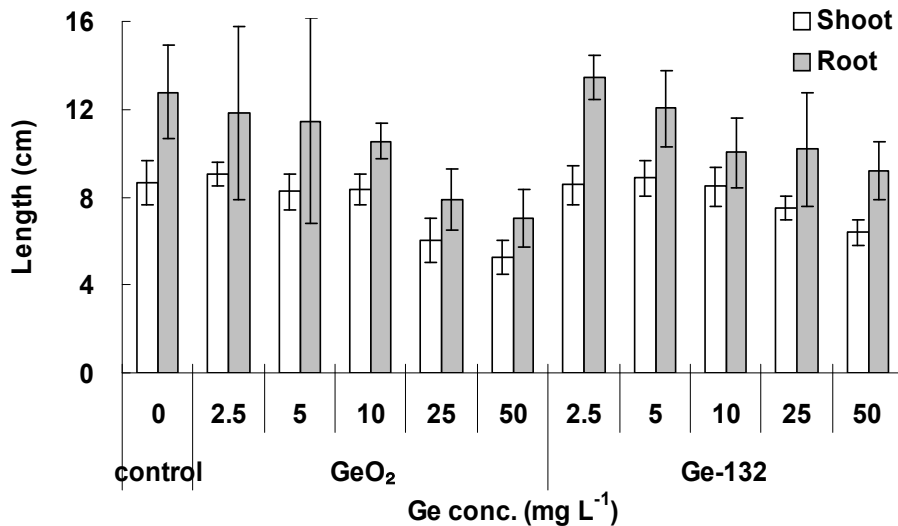


Fig. 3-88. 게르마늄 처리농도별 식물체 길이 비교

그리고 무기게르마늄과 유기게르마늄 처리농도별 지상부 및 지하부의 생체중과 길이의 생장울 을 비교 검토한 결과는 Fig. 3-89 및 3-90에서 보는바와 같다. 게르마늄 처리농도에 따른 생체중 변화는 무기게르마늄 처리에서는 2.5 mg L<sup>-1</sup>처리에서는 지상부 및 지하부 생체중 모두 대조구에 비하여 약 11-12% 증가되었고 5 mg L<sup>-1</sup>처리에서는 대조구에 비하여 약 3-5% 증가되었고 10 mg L<sup>-1</sup>이상의 처리에서는 감소되었다. 유기게르마늄 처리구에서는 지상부 생체중은 10 5 mg L<sup>-1</sup>처리 까지는 대조구에 비하여 약 4-19% 정도 증가되었고 25 mg L<sup>-1</sup>이상의 처리농도에서는 감소되었다. 그리고 지하부인 뿌리의 생체중은 무기게르마늄 처리구와는 달리 전체적으로 대조 구에 비하여 크게 감소되었다. 이는 무기게르마늄 처리시 뿌리의 외형적인 성장형태는 무기게르 마늄 처리구는 전반적으로 뿌리생장이 길이가 짧아지면서 두꺼워지는 경향이 있으며, 유기게르 마늄 처리에서는 뿌리가 매우 가늘고 길게 성장하는 특성 때문인 것으로 판단되며 이러한 결과는 뿌리 길이를 측정된 결과 (Fig. 3-90, Table 3-28)에서도 나타났다.



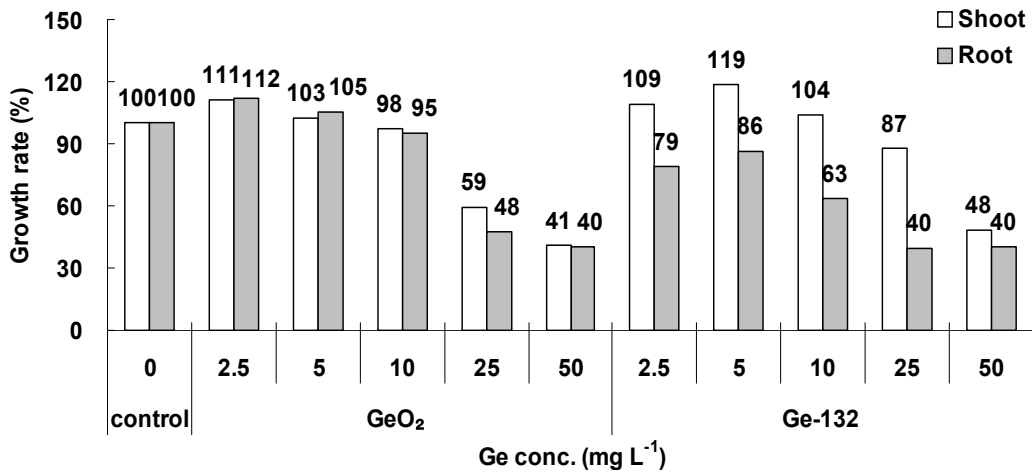


Fig. 3-89. 게르마늄 처리농도별 대조구에 생장을 비교

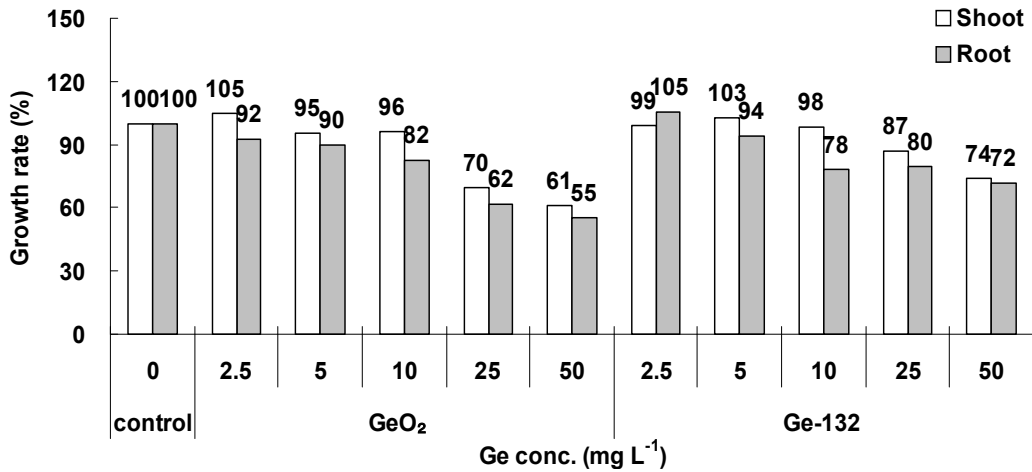


Fig. 3-90. 게르마늄 처리농도별 길이 생장을

그리고 지하부 뿌리의 전체길이, 표면적, 부피 및 직경을 조사한 결과는 Table 3-28에서 보는바와 같다. 뿌리의 전체 길이는 무기게르마늄 처리에서는 전체적으로 대조구에 비하여 감소되었으나 유기게르마늄 처리에서는 2.5 및 5 mg L<sup>-1</sup>처리에서 대조구에 비하여 각각 약 18-79% 증가되었다. 뿌리 전체의 표면적 및 부피는 무기게르마늄 처리에서는 전체적으로 전 농도에서 대조구에 비하여 감소되었으며 무기게르마늄 처리에서는 전체적으로 대조구와 거의 비슷하였으나 유기게르마늄 처리에서는 25 mg L<sup>-1</sup>처리 이후 부터는 크게 감소되었다.

따라서 잣에 대한 게르마늄의 생육저해 정도는 유기 및 무기게르마늄 모두 10 mg L<sup>-1</sup>처리까지는 나타나지 않았고 전체적으로 무기게르마늄은 5 mg L<sup>-1</sup>처리까지, 유기게르마늄은 10 mg L<sup>-1</sup>처리까지 지상부 및 지하부 성장반응이 대조구에 비하여 약간 증가되는 경향이였다. 그리고 본 연구에서 잣은 시험된 채소작물들인 상추와 오이에 비하여 무기 및 유기 게르마늄에 대한 내성이 더 강한 것으로 생각되었다.

Table 3-28. 게르마늄 처리농도별 지하부 생육특성

Types of Germanium	Concentration (mg L <sup>-1</sup> )	Length (cm)	Surface area (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Diameter (mm)
Control	0	113.53	13.04	0.11	0.36
	2.5	93.71	9.72	0.08	0.33
	5	44.32	5.55	0.06	0.40
	10	45.26	6.08	0.07	0.43
	25	27.52	2.91	0.02	0.34
	50	24.01	2.48	0.02	0.34
GeO <sub>2</sub>	2.5	133.86	14.24	0.12	0.34
	5	204.30	23.08	0.21	0.36
	10	84.66	11.03	0.11	0.42
	25	16.85	1.52	0.01	0.28
	50	16.57	1.23	0.01	0.24
	Ge-132	2.5	133.86	14.24	0.12
5		204.30	23.08	0.21	0.36
10		84.66	11.03	0.11	0.42
25		16.85	1.52	0.01	0.28
50		16.57	1.23	0.01	0.24

(2) 게르마늄 흡수 특성

(가) 식물체 부위별 게르마늄 함량 분포

게르마늄 농도별 처리에 따른 식물체 부위별 건조중량 및 게르마늄 함량을 조사한 결과는 Table 3-29에서 보는 바와 같다. 게르마늄 처리농도별 식물체 건조중량은 무기게르마늄은 10 mg L<sup>-1</sup>처리농도 까지, 유기게르마늄은 25 mg L<sup>-1</sup>처리농도 까지는 지상부 및 지하부 건조중량 모두 대조구에 비하여 약간 증가되었다. 대조구와 비교한 10 mg L<sup>-1</sup>처리농도 까지의 지상부 및 지하부 건조중량 평균증가율은 무기게르마늄 처리에서는 각각 약 32.4 및 66% 증가되었고, 유기게르마늄 처리에서는 각각 약 25.6 및 48% 증가되었다. 게르마늄 종류별 식물체내 전체 흡수량은 유기게르마늄 처리구에 비하여 무기게르마늄 처리구에서 약간 높았으나 큰 차이는 없었다. 게르마늄 처리농도별 흡수패턴은 전반적으로 무기 및 유기게르마늄 모두 처리농도가 높을수록 식물체내 흡수량이 증가되었다. 식물체 부위별 게르마늄 흡수 분포 농도는 게르마늄 종류에 따라 다르게 나타났는데 전반적으로 무기게르마늄 처리에서는 지상부인 잎에 주로 많이 분포되어 있었고 유기게르마늄의 경우에는 지하부인 뿌리에 주로 분포되어 있었다. 유기 및 무기게르마늄 50 mg L<sup>-1</sup>까지의 전체 처리구에서의 지상부 및 지하부 게르마늄 평균함량분포(Fig. 3-91)는 무기게르마늄의 경우 총 흡수된 게르마늄중 지상부인 잎에 약 70%, 지하부인 뿌리에 약 30%가 분포되어 있었다. 유기게르마늄의 경우에는 무기게르마늄과는 반대로 잎에 약 23%, 뿌리에 약 77%로 뿌리에 훨씬 많이 분포되어 있었다.

Table 3-29. 게르마늄 농도별 갖의 건물중량 및 게르마늄 함량

Treatment (mg L <sup>-1</sup> )		Dry weight (g plant <sup>-1</sup> )		Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )	
		Shoot	Root	Shoot	Root
Control	0	0.0508	0.0056	3.8	4.0
GeO <sub>2</sub>	2.5	0.0697	0.0091	90.9	125.9
	5	0.0693	0.0104	217.1	342.1
	10	0.0629	0.0085	346.1	398.1
	25	0.0410	0.0047	1629.6	933.1
	50	0.0357	0.0050	5852.0	1860.6
Ge-132	2.5	0.0636	0.0088	66.3	243.7
	5	0.0671	0.0082	139.3	477.3
	10	0.0608	0.0079	336.6	1018.0
	25	0.0556	0.0080	676.9	2847.0
	50	0.0412	0.0052	1460.4	4477.2

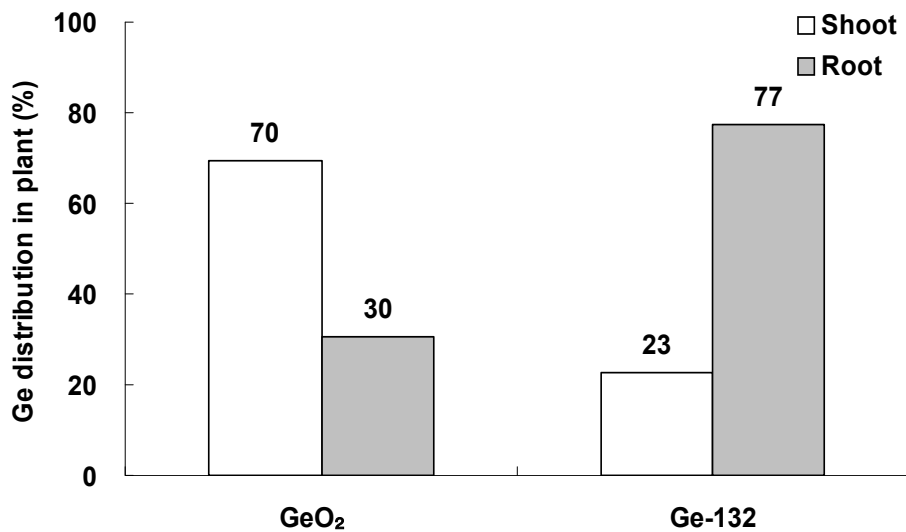


Fig. 3-91. 게르마늄의 식물체내 분포특성

(나) 식물체 개체당 게르마늄 흡수량 및 흡수율

식물체 부위별 건조중량과 게르마늄 함량을 이용하여 초기배양액내 투입된 총 게르마늄 함량 중 식물체내로 흡수된 양을 조사하여 비교 검토한 결과는 Table 3-30에서 보는바와 같다. 초기용액 내 투입된 게르마늄 함량은 각 처리농도별 용액 100 ml 내의 게르마늄 함량이며, 식물체내 게르마늄 흡수량은 갓 육묘 정식 12일 후의 식물체 1개체당 흡수량을 부위별 총 건조중량으로 환산한 값이다.

초기 용액 내 투입된 게르마늄의 식물체 개체당 흡수 이용효율 (Table 3-30)은 유기게르마

높에 비하여 무기게르마늄이 약간 높았다. 그리고 전체적으로 무기게르마늄은 지상부인 잎에 주로 분포되어 있었고 유기게르마늄은 지하부인 뿌리에 많이 분포되어 있었다. 식물체내 흡수된 게르마늄 함량은 무기게르마늄 처리구의 경우 처리농도 2.5 mg L<sup>-1</sup> (투입 게르마늄 함량 254 µg)에서는 전체 투입 게르마늄중 약 3%에 해당하는 약 7.49 µg (지상부 6.34 µg, 지하부 1.14 µg)이 식물체내로 흡수되었고 흡수된 게르마늄중 지상부인 잎에 약 84.8%, 지하부인 뿌리에 약 15.2%가 분포되어 있었다. 이러한 경향은 무기게르마늄 농도별 모든 처리구에서 비슷한 경향을 보였으며, 처리농도가 증가할수록 게르마늄 흡수량도 증가하였지만 흡수율은 일정한 경향을 보였다. 그리고 유기게르마늄 처리구의 경우에는 처리농도 2.5 mg L<sup>-1</sup> (투입 게르마늄 함량 249 µg)에서는 전체 투입 게르마늄 249 µg 중 약 2.6%에 해당하는 약 6.36 µg (지상부 4.22 µg, 지하부 2.14 µg)이 식물체내로 흡수되어 무기게르마늄에 비하여 식물체 흡수율이 약간 낮았다. 전체 흡수된 게르마늄중 잎에 약 66.3%, 뿌리에 약 33.4%로 무기게르마늄과 같이 지상부에 게르마늄 흡수율이 높았지만 무기게르마늄에 비해 지상부로 이동되는 양이 적은 것으로 보였다.

Table 3-30. 게르마늄 처리농도별 식물체 개체당 게르마늄 흡수량

Treatment	Ge concentration	Ge content (µg) in initial solution (100 mL)	Ge uptake µg plant <sup>-1</sup>		
			Shoot	Root	Total
Control	0	3	0.19	0.02	0.22
	2.5	254	6.34	1.14	7.49
	5	491	15.05	3.54	18.59
GeO <sub>2</sub>	10	915	21.75	2.53	24.28
	25	2400	66.79	4.35	71.15
	50	4890	208.79	9.26	218.05
Ge-132	2.5	249	4.22	2.14	6.36
	5	481	9.34	3.92	13.26
	10	957	20.47	8.08	28.55
Ge-132	25	2460	37.66	22.90	60.56
	50	4990	60.15	23.47	83.62

(다) 식물체 개체당 게르마늄 흡수율

무기게르마늄 및 유기게르마늄 농도별 처리구의 식물체내 부위별 흡수율을 종합 검토한 결과는 Fig. 3-92에서 보는 바와 같다. 초기 용액 내 투여된 게르마늄에 대한 식물체내 흡수율을

부위별로 살펴보면 무기게르마늄의 경우 지상부에서 2.4-4.3% 범위로 평균 약 3.0%이고, 지하부에서 0.2-0.7% 범위로 평균 약 0.4%이었다. 유기게르마늄의 경우에는 지상부에서 1.2-2.1% 범위로 평균 약 1.7%, 지하부에서는 0.5-0.9% 범위로 평균 약 0.8%이었다. 무기 게르마늄 처리구의 흡수율은 지상부가 지하부에 비해 약 7.5배 높았으며, 유기게르마늄의 경우에는 지상부가 지하부에 비해 약 2.1배 높았다. 무기게르마늄 및 유기게르마늄 모두 지상부의 흡수율이 높았지만 유기게르마늄의 경우 지하부의 흡수율이 무기게르마늄에 비해 높았다.

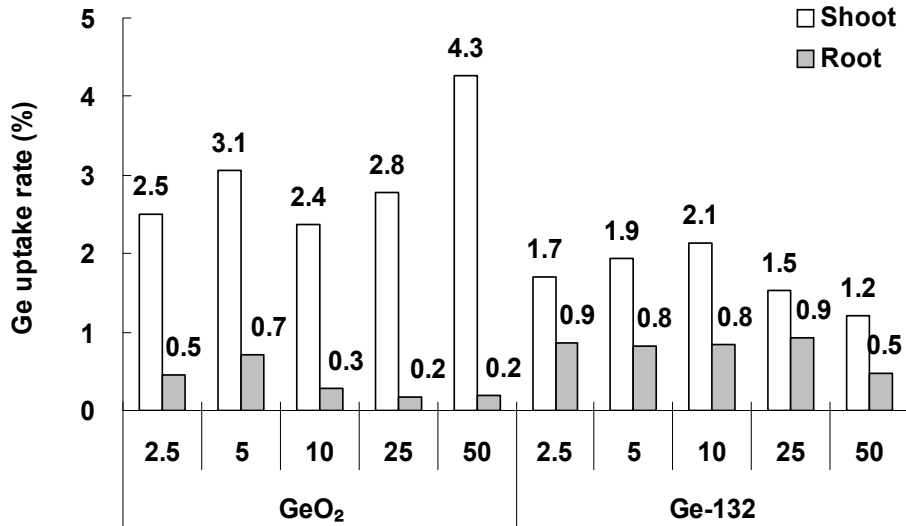


Fig. 3-92. 게르마늄 처리농도별 식물체 개체당 게르마늄 흡수율

(라) 배양액 및 식물체내 무기이온 함량 변화

식물체 생육 전후 배양액 및 식물체내 K, Ca, Mg 및 Na 함량 변화를 조사한 결과는 Table 3-31 및 Table 3-32 에서 보는바와 같다. 식물체 생육전과 생육후의 배양액내 K, Ca, Mg 및 Na 함량 변화 (Table 3-31)는 전체적으로 무기게르마늄 및 유기게르마늄 처리구 모두에서 게르마늄에 대한 저해를 받지 않은 5 mg L<sup>-1</sup> 이내의 농도에서는 무처리에 비하여 배양액내 잔존량이 적었으며, 10 mg L<sup>-1</sup> 이상의 농도에서는 배양액내 잔존량이 게르마늄 처리농도가 높을수록 많았다. 그리고 식물체내 K, Ca, Mg 및 Na 함량을 조사한 결과는 Table 3-32에서 보는바와 같다. 식물체내 주용 양이온 함량은 무기 및 유기게르마늄 처리에서 다르게 나타났으며 전체적으로 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마늄 처리구에서 높았다. 생장저해를 비교적 받지 않는 정상적인 생육 처리농도인 10 mg L<sup>-1</sup> 처리농도 까지의 각 양이온의 함량은 무기게르마늄 처리구에서는 지상부인 잎에서는 K와 Na함량은 대조구에 비하여 감소되었고 Ca 및 Mg 함량은 차이가 없었다. 지하부인 뿌리의 경우에는 Ca 함량은 대조구와 대조구와 차이가 없었으나 K, MG 및 Na 이온은 증가되었다. 유기게르마늄 처리구에서는 지상부인 잎에서는 K 및 Na 함량은 차이가 없었으나 Ca 및 Mg 함량이 증가되었고 뿌리에서는 K, Ca, Mg 및 Na 함량 모두 증가되었다.

Table 3-31. 게르마늄 처리농도에 따른 갯 재배 전후의 양액내 주요 양이온 함량 변화

Types of Germanium	Conc. (mg L <sup>-1</sup> )	Contents in initial solution				Contents in solution after growth			
		K	Ca	Mg	Na	K	Ca	Mg	Na
		----- mg L <sup>-1</sup> -----							
Control	0	143	80.7	26.5	3.03	110.7	63.8	22.7	0.90
	2.5	142	80.3	26.2	3.32	103.6	58.0	21.0	1.31
	5	143	81.3	26.5	2.96	109.0	61.1	21.6	0.75
GeO <sub>2</sub>	10	145	81.2	26.6	3.11	112.5	62.7	22.2	1.37
	25	143	80.6	26.3	3.37	117.0	67.9	23.3	2.23
	50	141	80.9	26.1	3.36	119.4	70.0	23.3	2.95
Ge-132	2.5	142	80.7	26.2	3.00	107.7	59.6	21.3	0.79
	5	144	80.8	26.4	3.19	106.6	58.9	21.2	0.92
	10	142	81.2	26.2	3.25	107.9	62.5	21.6	1.16
	25	144	81.3	26.6	3.00	112.8	66.4	22.1	1.56
	50	143	81.2	26.2	3.22	121.3	72.2	23.3	1.82

Table 3-32. 게르마늄 처리농도에 따른 식물체(갯)내 주요 양이온 함량

Types of Germanium	Conc. (mg L <sup>-1</sup> )	Shoot				Root			
		K	Ca	Mg	Na	K	Ca	Mg	Na
		----- mg kg <sup>-1</sup> -----							
Control	0	514.0	273.3	61.6	34.5	34.7	13.2	2.6	0.237
	2.5	443.7	260.0	60.7	23.5	39.9	13.1	2.9	0.266
	5	435.7	257.0	62.8	27.9	51.7	13.8	4.3	0.440
GeO <sub>2</sub>	10	480.5	269.5	62.6	23.4	54.0	9.2	4.0	0.329
	25	382.0	190.0	44.5	17.0	27.0	7.2	1.4	0.265
	50	313.0	159.0	40.4	20.1	32.5	6.8	2.3	0.118
Ge-132	2.5	511.3	313.7	72.7	32.8	49.8	16.8	4.4	0.452
	5	556.3	328.3	78.2	34.3	51.7	16.5	4.1	0.866
	10	503.3	277.0	67.7	30.9	42.2	9.4	3.2	0.263
	25	355.0	171.3	51.0	29.0	30.1	7.3	2.3	0.096
	50	249.7	104.6	33.2	16.5	24.8	4.6	2.4	0.048

#### 4. 비고형배지경 (소형 담액경)을 이용한 게르마늄 최적처리 방법 구명 및 식물체내 게르마늄 이동 특성 구명

##### 가. 갓 재배 및 게르마늄 처리 방법

###### (1) 갓 재배 방법

식물체내 게르마늄 최적처리 방법 및 흡수특성 구명을 위한 갓 재배는 비고형배지경 (소액담액경)의 재배상을 스티로폼용기 (L56 × W44 × H15 cm)로 제작하여 담액수경방식으로 분잎이 4-5 장인 갓 육묘를 30×60 cm간격으로 4주씩 정식 후 재배하였다. 실험에 사용한 양액은 일본원예시험장 표준양액 처방기준에 준하여 표준액의 1/2배액을 사용하였으며, 재배상당 20 L의 양액을 넣고 에어펌프를 통하여 통기시키면서 35일간 배양하였다. 배양기간 동안 증산작용과 증발에 의하여 손실되는 양액은 3일 간격으로 양액을 보충하여 20 L이 유지되도록 하였다.

###### (2) 게르마늄 처리방법

게르마늄 처리는 무기게르마늄 ( $\text{GeO}_2$ )과 유기게르마늄 (Ge-132) 모두 양액내처리를 하였으며 처리방법은 12 및 24  $\text{mg L}^{-1}$ 의 2개의 농도처리구로 하여 ① 정식 후 1회 양액내 처리, ② 양액내 분할처리 및 ③ 양액내 수확전 처리의 3가지 방법으로 하였다. 정식 후 1회 양액내처리는 정식 10일후에 양액내 농도가 각각 12 및 24  $\text{mg L}^{-1}$ 되도록 1회 처리하였다. 분할처리는 정식 10일 후부터 3  $\text{mg L}^{-1}$  씩 3일 간격으로 8회 및 3  $\text{mg L}^{-1}$  씩 6일 간격으로 4회 처리하였다. 그리고 수확전 처리는 갓을 수확하기 10일전에 양액의 농도가 12 및 24  $\text{mg L}^{-1}$ 가 되도록 처리하였다. 게르마늄 종류와 처리방법별 갓 생육 전기간 동안에 투입된 게르마늄 총량은 12  $\text{mg L}^{-1}$ 처리구는 모두 약 240mg이었고 24  $\text{mg L}^{-1}$  처리구는 모두 약 480 mg이었다.

##### 나. 게르마늄 최적 처리방법 및 흡수특성 구명

갓 재배시 게르마늄 최적 처리방법 및 흡수특성을 구명하기 위하여 비고형배지경 (소액담액경)의 재배상에 담액수경방식으로 4-5장인 갓 육묘를 정식 후 게르마늄을 12 및 24  $\text{mg L}^{-1}$  농도로 ① 정식 후 1회 양액내 처리, ② 양액내 분할처리 및 ③ 양액내 수확전 처리의 3가지 방법으로 처리하여 정식 35일 후의 생육특성과 식물체 부위별 게르마늄 함량 분포 특성 등을 비교 검토하였다.

###### (1) 성장반응특성

게르마늄 처리방법에 따른 갓의 생육특성을 조사한 결과는 Fig. 3-93, 3-94, 3-95, 3-96, 3-97, 3-98에서 보는바와 같다. 게르마늄 처리방법에 따른 게르마늄 종류 및 농도별 생육특성은 전반적으로 무기 게르마늄의 경우 생육 저해가 나타났지만 유기게르마늄은 생육 저해가 거의 없었다. 유기 게르마늄의 경우에는 지상부와 지하부 모두 게르마늄 처리 방법 및 농도별로 생육에 큰 차이가 없었고 무기게르마늄의 경우에는 농도에 따라 생육에 차이가 나타났는데 12  $\text{mg L}^{-1}$ 에서는 지상부와 지하부 모두 생육저해가 없었으나 24  $\text{mg L}^{-1}$ 에서는 생육저해가 나

타났다. 특히 정식후 1회 처리의 지하부 생육저해가 두드러지게 나타났다.



정식 직후

수확전

Fig. 3-93. 갯의 정식직후 및 수확전 생육상황.



ig. 3-94. 게르마늄 처리방법별 생육비교.

게르마늄 처리 방법에 따른 게르마늄 종류별 지상부와 지하부의 생체중을 비교 검토한 결과는 Fig. 3-95 및 3-96에서 보는 바와 같다. 게르마늄 처리 방법에 따른 지상부 생체중은  $12 \text{ mg L}^{-1}$  에서는 무기 게르마늄의 경우 모든 처리방법별로 비슷하거나 약간 증가하였고, 유기



게르마늄의 경우 모든 처리방법별로 23-33% 증가하였다. 24 mg L<sup>-1</sup> 에서는 무기와 유기 게르마늄 모두 생체중이 감소하였는데 무기 게르마늄의 에서 정식 후 1회 처리, 분할처리 및 수확 전 처리가 각각 33, 9 및 5%, 유기 게르마늄에서 27, 2 및 11% 감소하였다. 처리 방법에 따른 생체중 감소는 정식 후 1회 양액내 처리에서 가장 크게 나타났다.

게르마늄 처리 방법에 따른 지하부 생체중은 12 mg L<sup>-1</sup> 에서는 무기 게르마늄의 경우 모든 처리방법별로 비슷하였고, 유기 게르마늄의 경우는 약간 증가하였다. 24 mg L<sup>-1</sup> 에서는 유기 게르마늄의 경우에는 모든 처리 방법에서 큰 차이 없이 비슷하였고, 무기 게르마늄의 경우에는 분할 처리 및 수확전 처리는 대조구와 비슷하였지만 정식후 1회 처리의 경우 44% 감소하였다.

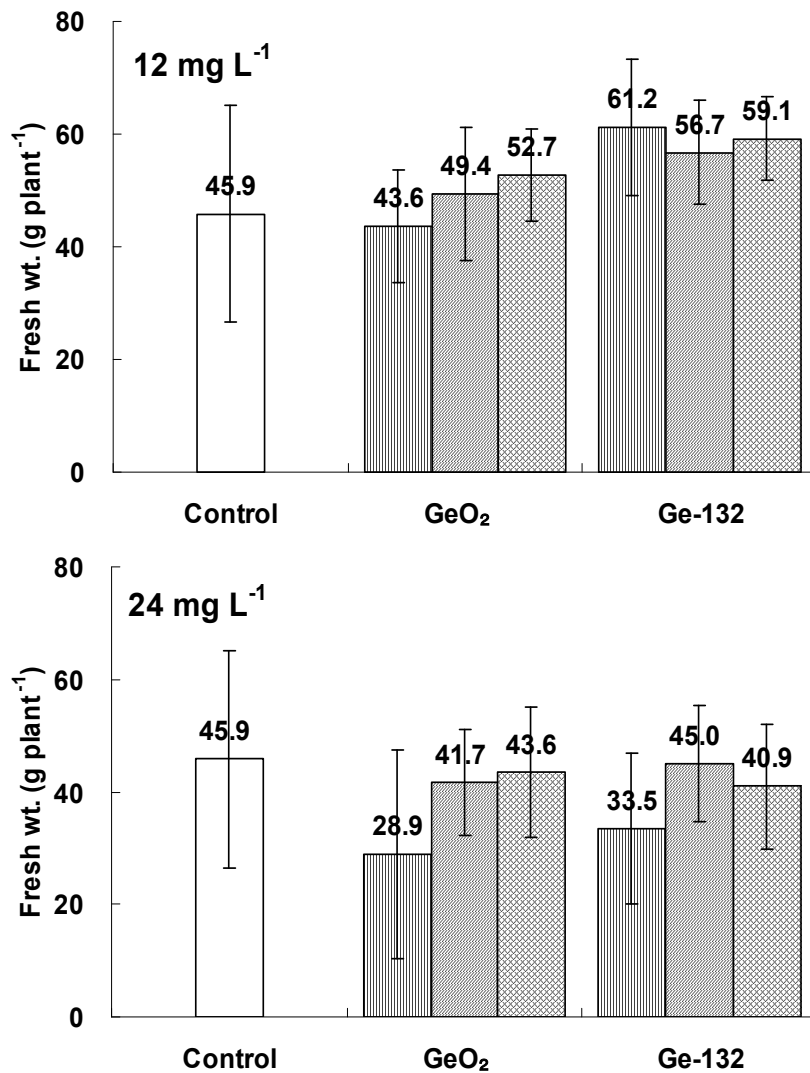


Fig. 3-95. 게르마늄 처리 방법에 따른 지상부 생체중 비교.

□ : Control, ▨ : 정식후 1회 처리, ▩ : 분할 처리, ▩ : 수확전 처리.

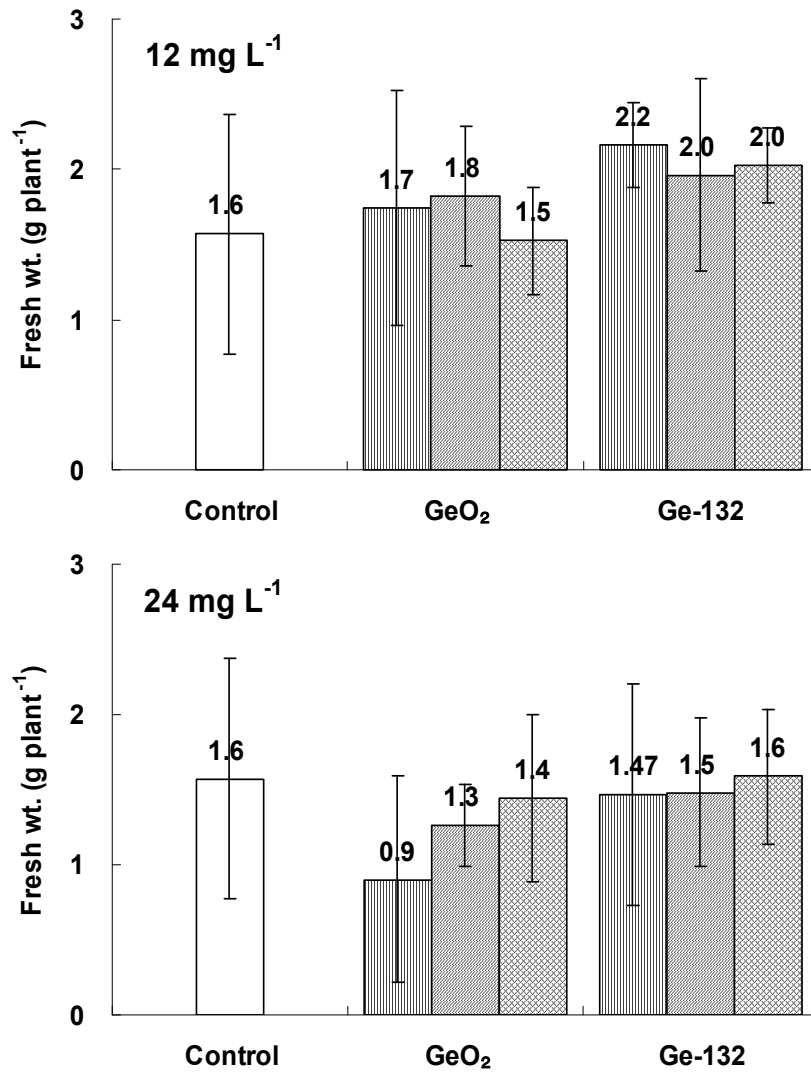


Fig. 3-96. 게르마늄 처리 방법에 따른 지하부 생체중 비교.

□ : Control, ▨ : 정식후 1회 처리, ▩ : 분할 처리, ▪ : 수확전 처리.

게르마늄 처리 방법에 따른 게르마늄 종류별 지상부와 지하부의 길이를 비교 검토한 결과는 Fig. 3-97 및 3-98에서 보는 바와 같다. 게르마늄 처리 방법에 따른 지상부 길이는 무기게르마늄의 경우 12 및 24 mg L<sup>-1</sup> 모두 정식후 1회 처리에서 길이가 감소하였고, 다른 처리 방법에서는 별차이 없었다. 유기 게르마늄의 경우에는 12 mg L<sup>-1</sup>에서는 모든 처리구에서 약간씩 증가하였고, 24 mg L<sup>-1</sup>에서는 정식후 1회 처리에서는 길이가 약간 감소하였지만 다른 처리구에서는 비슷하였다.

게르마늄 처리 방법에 따른 지하부 길이는 대체적으로 무기 및 유기 게르마늄 모두 지상부의 길이와 비슷한 경향이었으나 지상부에 비해 생육 저해가 크게 나타났다.

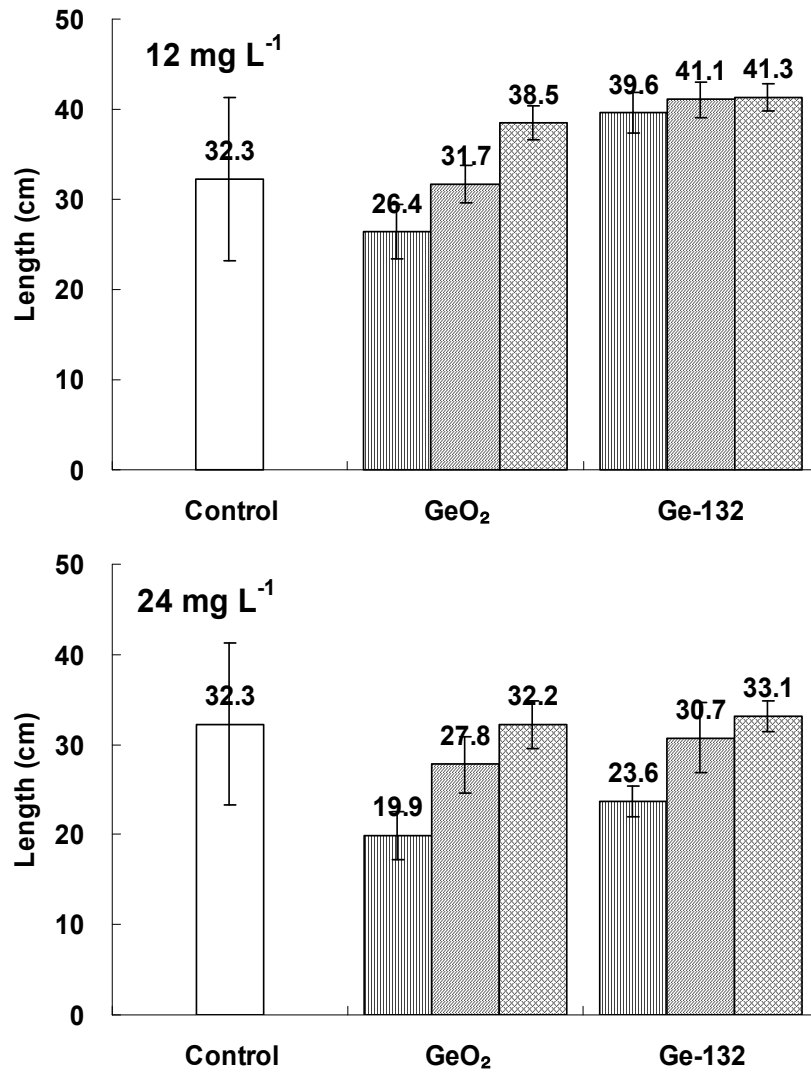


Fig. 3-97. 게르마늄 처리 방법에 따른 지상부 길이 비교.

□ : Control, ▨ : 정식후 1회 처리, ▩ : 분할 처리, ▪ : 수확전 처리.

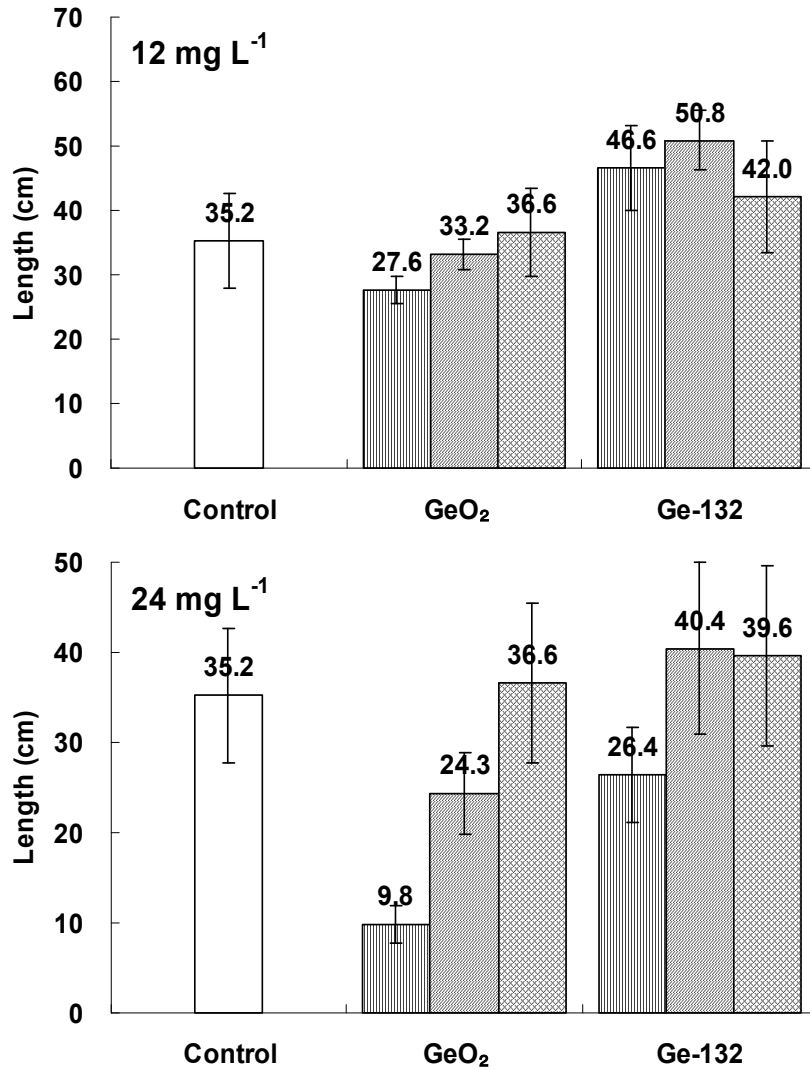


Fig. 3-98. 게르마늄 처리 방법에 따른 지하부 길이 비교.

□ : Control, ▨ : 정식후 1회 처리, ▩ : 분할 처리, ▤ : 수확전 처리.

## (2) 엽록소 함량

엽록소 함량은 Richardson (2002) 등과 Barnes (1992) 등의 방법에 따라 시료 100 mg에 65°C에서 preheated DMSO (dimethyl sulphoxide)를 5 ml 첨가 한 후 다시 65°C에서 1시간 incubation하여 665nm 와 648nm에서 흡광도를 측정하여 chlorophyll -a 및 b 함량을 측정하였다.

게르마늄 처리 방법에 따른 식물체내 chlorophyll -a 및 b 함량 변화를 조사한 결과는 Table 3-33에서 보는바와 같다. 무기게르마늄의 경우에는 모든 처리구에서 chlorophyll -a 및 b 함량이 감소하는 경향이었는데 12 mg L<sup>-1</sup> 보다 24 mg L<sup>-1</sup> 에서 더 감소하였고, 특히 정식후 1회 처리의 경우 chlorophyll -a 및 b 함량이 가장 낮았다. 유기게르마늄의 경우에는 반대로 모든 처리구에서 대조구보다 chlorophyll -a 및 b 함량이 높았다. chlorophyll -a 및 b 함량은 무기 게르마늄 처리구에서 무처리에 비하여 감소되고 유기 게르마늄에서는 증가되는 것으로 나타나 무기게르마늄은 식물체의 광합성에 영향을 미치는 것으로 생각되었다.

Table 3-33. 게르마늄 처리방법에 따른 엽록소 함량 비교

Treatment (mg L <sup>-1</sup> )		Chlorophyll	Chlorophyll	Chlorophyll	
		a	b	a + b	
		μg g <sup>-1</sup> Fresh wt.			
Control		491.0	121.2	625.5	
GeO <sub>2</sub>	12	정식직후 처리	432.7	116.3	595.2
		분할 처리	411.2	118.9	598.6
		수확전 처리	495.5	131.4	640.6
	24	정식직후 처리	341.0	92.0	442.6
		분할 처리	437.9	114.3	564.2
		수확전 처리	409.2	116.8	537.7
Ge-132	12	정식직후 처리	655.0	174.9	848.2
		분할 처리	618.5	168.0	803.8
		수확전 처리	609.4	318.9	951.9
	24	정식직후 처리	495.5	131.4	640.6
		분할 처리	494.5	173.7	683.7
		수확전 처리	555.3	157.8	728.9

### (3) 뿌리 세포 특성

게르마늄 종류에 따른 뿌리 세포 특성을 보기위해 0.05% Trypan blue (lactic acid : glycerol : DW= 1 : 2 : 2)에 침지시켜 실온에서 2시간 염색 후 2-3회 물로 씻어내어 현미경 BX50 OLYMPUS (JAPAN)을 사용하여 200배에서 측정하였다.

게르마늄 종류에 따른 뿌리의 생육 저해는 앞서서의 실험결과 무기 게르마늄은 근장이 줄어들고, 근경이 증가하는 경향이고, 유기 게르마늄은 근경이 줄어들어 가는 경향이었다. 이러한 저해 현상은 뿌리 세포에 영향을 미칠 것으로 생각되어 현미경으로 200배에서 관찰한 결과는 Fig. 3-99와 같다. 무기 게르마늄의 뿌리 세포 특성은 대조구와 형태적으로 많은 차이를 보였는데 무기 게르마늄의 경우에는 세포의 크기가 매우 작고, 세포수가 증가하여 매우 조밀한 형태를 보이고 있으며 유기게르마늄의 경우에는 세포의 크기가 매우 크고, 세포수는 감소하였다.

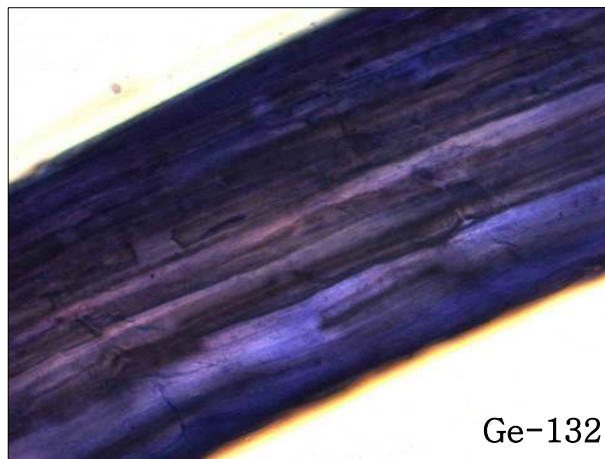
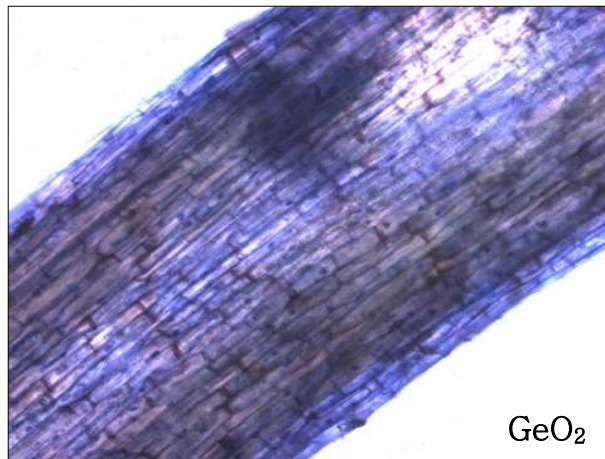
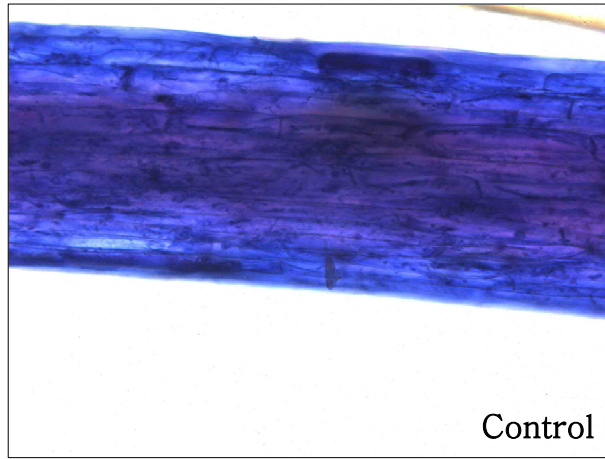


Fig. 3-99. 게르마늄 처리에 따른 뿌리 현미경 비교 사진.

(4) 게르마늄 처리 방법에 따른 흡수 특성 및 이동특성

(가) 처리방법별 식물체내 게르마늄 함량

게르마늄 처리방법에 따른 식물체 부위별 건조중량 및 게르마늄 함량을 조사한 결과는 Table 3-34에서 보는 바와 같다. 식물체 부위별 건조중량은 무기와 유기 게르마늄 모두 24 mg L<sup>-1</sup> 에서 약간 감소하는 경향이였다. 식물체 부위별 게르마늄 흡수 분포 농도는 무기 및 유기 게르마늄 모두 전반적으로 지하부에 많이 분포되어있었다. 하지만 무기 게르마늄이 유기 게르마늄에 비해 지상부의 게르마늄 함량이 더 높았다.

게르마늄 처리방법에 따른 식물체 게르마늄 함량은 농도가 높을수록 증가하였고, 처리 방법 별 지상부의 게르마늄 함량은 무기 및 유기 게르마늄 모두 정식후 1회 처리 > 분할 처리 > 수확전 처리 순이었으며, 정식후 1회 처리와 분할 처리의 함량은 큰 차이가 없었지만 수확전 처리의 경우에는 다른 방법에 비해 게르마늄 함량이 매우 낮았다. 지하부의 경우에는 정식 직후 처리의 함량이 가장 높았으며 무기 게르마늄의 경우 분할처리 및 수확전 처리는 비슷한 함량을 보였으나 유기 게르마늄의 경우 분할 처리보다 오히려 수확전 처리의 게르마늄 함량이 더 높았고 농도에 따른 경향은 유사하였다. 이것은 유기 게르마늄이 지하부로는 비교적 빠르게 흡수되지만 지상부로의 이동이 잘되지 않아 지하부에 게르마늄이 잔존되어 있기 때문으로 생각된다.

Table 3-34. 게르마늄 처리 방법 따른 건물중량 및 게르마늄 함량

Treatment (mg L <sup>-1</sup> )	Dry weight (g plant <sup>-1</sup> )		Ge content (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Shoot	Root	Shoot	Root	
Control	2.36	0.09	6.2	7.6	
12	정식후 1회 처리	2.05	0.10	483.3	708.5
	분할 처리	2.57	0.09	231.0	496.3
	수확전 처리	2.70	0.08	87.4	584.5
24	정식후 1회 처리	1.73	0.07	620.8	1181.4
	분할 처리	2.30	0.07	494.6	834.8
	수확전 처리	2.45	0.08	150.3	826.3
12	정식후 1회 처리	2.36	0.13	90.3	1273.9
	분할 처리	2.94	0.10	87.8	732.2
	수확전 처리	2.70	0.11	69.5	1214.6
24	정식후 1회 처리	1.77	0.08	156.4	1986.4
	분할 처리	2.36	0.08	165.0	1219.9
	수확전 처리	2.12	0.08	95.1	1734.2

#### (나) 처리방법별 식물체내 게르마늄 흡수량

게르마늄 처리방법에 따른 식물체 부위별 건물중량과 게르마늄 함량 (Table 3-34)을 이용하여 게르마늄 처리용액 내 투입된 전체 게르마늄 함량 중 식물체내로 흡수된 양을 조사하여 비교 검토한 결과는 Fig. 3-100 및 3-101에서 보는바와 같다. 갖의 재배 기간 동안 처리 방법 별 게르마늄 함량은 12 및 24 mg L<sup>-1</sup>로 처리조 별 투입된 게르마늄 량은 각각 약 240 및 480 mg 이었다. 식물체내 게르마늄 흡수량은 갖 육묘 정식 35일 후의 식물체 4개의 흡수량을 부위별 총 건조중량으로 환산하였다.

게르마늄 처리 방법별 초기 용액 내 투입된 게르마늄 중 식물체내로 흡수된 총량은 무기 게르마늄 12 mg L<sup>-1</sup>은 정식후 1회 처리, 분할 처리 및 수확전 처리에서 각각 4.24, 3.58 및 1.13 mg이었고, 24 mg L<sup>-1</sup>은 각각 4.64, 4.80 및 1.74 mg 이었다. 게르마늄 농도에 따른 게르마늄 함량은 차이가 났지만 건물중량으로 환산한 게르마늄 흡수량은 큰 차이가 없었다. 유기 게르마늄 12 mg L<sup>-1</sup>은 정식후 1회 처리, 분할 처리 및 수확전 처리에서 각각 1.50, 1.32 및 1.29 mg 이었고, 24 mg L<sup>-1</sup>은 각각 1.71, 1.96 및 1.38 mg 이었다. 유기 게르마늄의 경우에도 무기 게르마늄과 마찬가지로 함량의 차이는 났지만 흡수량은 농도에 따라 큰 차이 없었다.

게르마늄 종류에 따른 식물체내 흡수량은 무기 및 유기 게르마늄의 모두 건물중량이 많은 지상부에서 높았다. 하지만 식물체 부위별로 살펴본 결과 지상부에는 무기 게르마늄의 흡수량이 높았고 지하부에서는 유기 게르마늄의 흡수량이 높았다.

게르마늄 처리 방법에 따른 전체 식물체내 게르마늄 흡수량은 무기 게르마늄의 경우에는 정식후 1회 처리 및 분할처리가 비슷한 흡수량을 보였으며 수확전 처리의 경우 다른 처리구에 비해 매우 낮은 흡수량을 보였다. 유기 게르마늄의 경우에는 처리방법에 따른 게르마늄 흡수량의 차이는 없었다. 전체 게르마늄의 흡수량에서는 차이가 없지만 지하부의 게르마늄 흡수량은 처리방법별로 큰 차이가 나타났는데 정식후 1회 처리 및 수확전 처리의 경우에 분할 처리에 비해 흡수량이 매우 높았다. 수확전 처리는 수확전 짧은 시간 처리하였지만 지하부의 게르마늄 흡수량이 높은 것은 유기 게르마늄은 지하부에서의 흡수는 빠르지만 지상부로의 이동이 잘되지 않아 뿌리에 대부분이 잔존되어 있기 때문이라 생각된다.



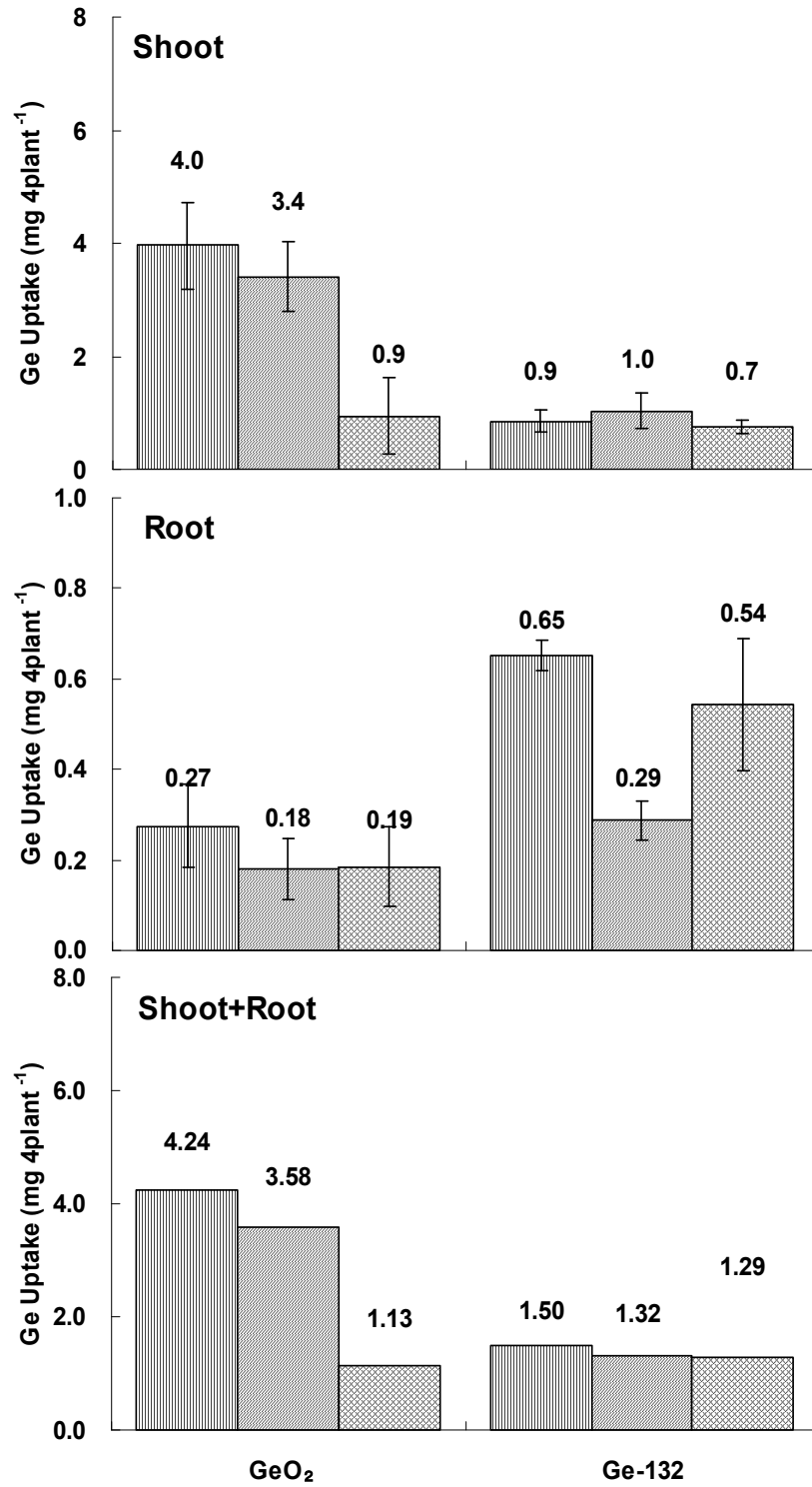


Fig. 3-100. 게르마늄 처리방법에 따른 12 mg L<sup>-1</sup>에서 갖의 게르마늄 흡수량.

▨ : 정식후 1회 처리, ▩ : 분할 처리, ▤ : 수확전 처리.

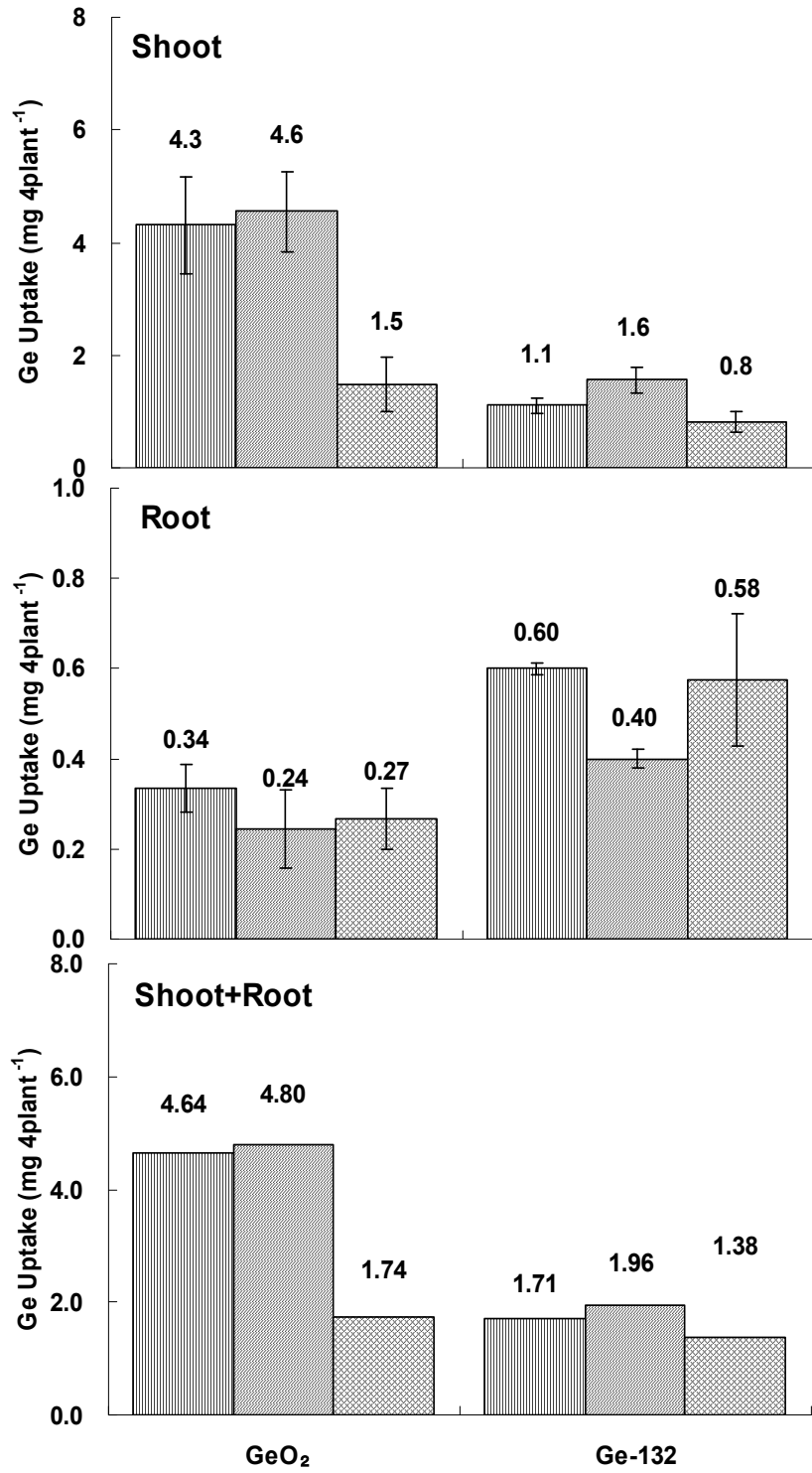


Fig. 3-101. 게르마늄 처리방법에 따른 24 mg L<sup>-1</sup>에서 갓의 게르마늄 흡수량.

▨ : 정식후 1회 처리, ▧ : 분할 처리, ▩ : 수확전 처리.

(다) 처리방법별 식물체내 게르마늄 흡수율 구명 및 최적처리방법 구명

게르마늄 처리방법에 따른 식물체 부위별로 흡수된 게르마늄 총량을 이용하여 식물체 부위별 흡수율을 종합 검토한 결과는 Fig. 3-102에서 보는 바와 같다.

초기 용액 내 투여된 게르마늄에 대한 식물체내 흡수율을 부위별로 살펴보면 12 mg L<sup>-1</sup>의

경우 무기게르마늄은 지상부에서 정식후 1회 처리, 분할 처리 및 수확전 처리에서 각각 1.65, 1.42 및 0.39%, 지하부에서 0.11, 0.08 및 0.08 로 대부분이 지상부로 흡수되었고, 정식후 1회 처리 및 분할 처리의 흡수율이 높았다. 그리고 유기 게르마늄은 정식후 1회 처리, 분할 처리 및 수확전 처리에서 각각 지상부가 0.36, 0.43 및 0.31% 이었고, 지하부가 각각 0.27, 0.12 및 0.23%이었다. 지상부의 흡수율이 높지만 지하부와 큰차이는 없었고, 처리방법에 따른 흡수율의 차이도 크지 않았다. 24 mg L<sup>-1</sup>의 경우 무기게르마늄은 지상부에서 정식후 1회 처리, 분할 처리 및 수확전 처리에서 각각 0.89, 0.95 및 0.30%, 지하부에서 0.07, 0.05 및 0.06%로 대부분이 지상부로 흡수되었고, 정식후 1회 처리 및 분할 처리의 흡수율이 높아 농도에 따른 경향은 비슷하였다. 그리고 유기 게르마늄은 정식후 1회 처리, 분할 처리 및 수확전 처리에서 각각 지상부가 0.23, 0.32 및 0.17% 이었고, 지하부가 각각 0.12, 0.08 및 0.12%이었다.

따라서 게르마늄 처리방법에 따른 식물체 성장반응과 식물체내 게르마늄 분포농도, 흡수량 및 흡수율 등의 결과들을 종합적으로 비교 검토한 결과는 다음과 같다. 무기게르마늄 및 유기 게르마늄 모두 정식후 1회 처리 및 분할 처리가 가장 효과적이었고 유기 게르마늄에 비해 무기 게르마늄이 더 효과적이었다. 게르마늄 농도에 따른 게르마늄 함량은 24 mg L<sup>-1</sup>에서 높지만 건물중량을 고려한 게르마늄의 흡수량은 농도에 따른 차이가 거의 없어 12 mg L<sup>-1</sup>을 처리하는 것이 더 효과적이라 생각된다.

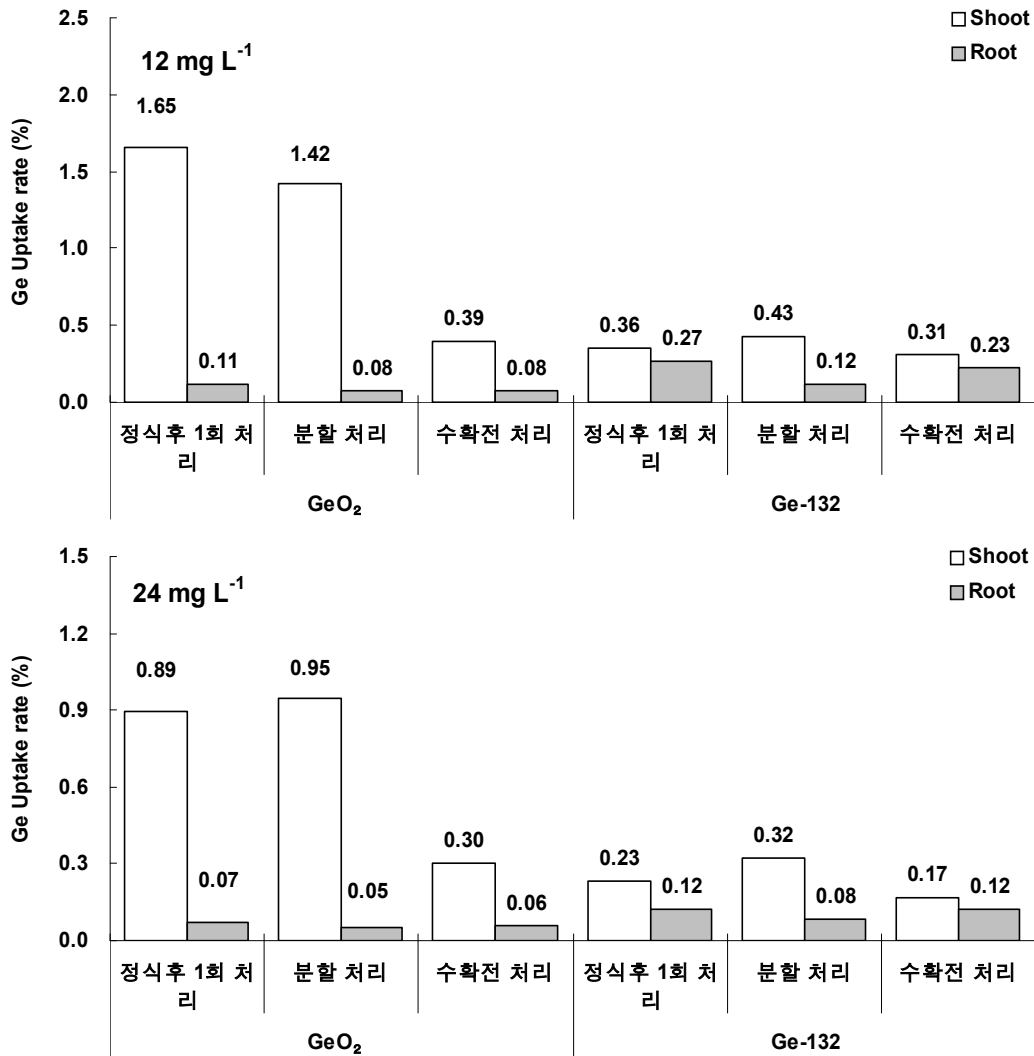


Fig. 3-102. 게르마늄 처리방법에 따른 잣의 게르마늄 흡수율.

### 5. 연구결과 요약

잣 생육에 대한 게르마늄 독성발생 농도 범위 및 최적 게르마늄 처리 농도를 구명하기 위하여 게르마늄 처리 농도별 생육특성, 식물체 내 게르마늄 흡수특성, 양액 내 게르마늄 및 일반 성분 함량 변화 등을 조사하였다. 잣에 대한 게르마늄의 생육저해 정도는 유기 및 무기게르마늄 모두 10 mg L<sup>-1</sup>처리까지는 나타나지 않았고 전체적으로 무기게르마늄은 5 mg L<sup>-1</sup>처리까지, 유기게르마늄은 10 mg L<sup>-1</sup>처리까지 지상부 및 지하부 성장반응이 대조구에 비하여 약간 증가되는 경향이였다. 게르마늄 처리농도별 식물체 건조중량은 무기게르마늄은 10 mg L<sup>-1</sup>처리 농도 까지, 유기게르마늄은 25 mg L<sup>-1</sup>처리농도까지는 지상부 및 지하부 건조량 모두 대조구에 비하여 약간 증가되었다. 게르마늄 종류별 식물체내 전체 게르마늄 흡수량은 유기게르마늄 처리구에 비하여 무기게르마늄 처리구에서 약간 높았으나 큰 차이는 없었으며, 게르마늄 처리 농도별 흡수패턴은 전반적으로 무기 및 유기게르마늄 모두 처리농도가 높을수록 식물체내 흡수량이 증가되었다. 식물체 부위별 게르마늄 흡수 분포 농도는 게르마늄 종류에 따라 다르게 나타났는데 전반적으로 무기게르마늄 처리에서는 지상부인 잎에 주로 많이 분포되어 있었고

유기게르마늄의 경우에는 지하부인 뿌리에 주로 분포되어 있었다. 유기 및 무기게르마늄 50 mg L<sup>-1</sup>까지의 전체 처리구에서의 지상부 및 지하부 게르마늄 평균함량분포는 무기게르마늄의 경우 총 흡수된 게르마늄 중 지상부인 잎에 약 70%, 지하부인 뿌리에 약 30%가 분포되어 있었다. 유기게르마늄의 경우에는 무기게르마늄과는 반대로 잎에 약 23%, 뿌리에 약 77%로 뿌리에 훨씬 많이 분포되어 있었다.

초기 양액 내 투입된 게르마늄의 식물체 개체 당 흡수 이용효율은 유기게르마늄에 비하여 무기게르마늄이 약간 높았다. 식물체내 흡수된 게르마늄 함량은 무기게르마늄 처리구의 경우 처리농도 2.5 mg L<sup>-1</sup> (투입 게르마늄 함량 254 µg)에서는 전체 투입 게르마늄중 약 3%에 해당하는 약 7.49 µg (지상부 6.34 µg, 지하부 1.14 µg)이 식물체내로 흡수되었고 흡수된 게르마늄 중 지상부인 잎에 약 84.8%, 지하부인 뿌리에 약 15.2%가 분포되어 있었다. 유기게르마늄 처리구의 경우에는 처리농도 2.5 mg L<sup>-1</sup> (투입 게르마늄 함량 249 µg)에서는 전체 투입 게르마늄 249 µg중 약 2.6%에 해당하는 약 6.36 µg (지상부 4.22 µg, 지하부 2.14 µg)이 식물체내로 흡수되어 무기게르마늄에 비하여 식물체 흡수율이 약간 낮았다. 전체 흡수된 게르마늄 중 잎에 약 66.3%, 뿌리에 약 33.4%로 무기게르마늄과 같이 지상부에 게르마늄 흡수율이 높았지만 무기게르마늄에 비해 지상부로 이동되는 양이 적은 것으로 보였다.

식물체내 주요 양이온 함량은 무기 및 유기게르마늄 처리에서 다르게 나타났으며 전체적으로 무기게르마늄 처리구에 비하여 유기게르마늄 처리구에서 높았다. 생장저해를 비교적 받지 않는 정상적인 생육 처리농도인 10 mg L<sup>-1</sup> 처리농도까지의 각 양이온의 함량은 무기게르마늄 처리구에서는 지상부인 잎에서는 K와 Na함량은 대조구에 비하여 감소되었고 Ca 및 Mg 함량은 차이가 없었다. 지하부인 뿌리의 경우에는 Ca 함량은 대조구와 대조구와 차이가 없었으나 K, MG 및 Na 이온은 증가되었다. 유기게르마늄 처리구에서는 지상부인 잎에서는 K 및 Na 함량은 차이가 없었으나 Ca 및 Mg 함량이 증가되었고 뿌리에서는 K, Ca, Mg 및 Na 함량 모두 증가되었다.

식물체내 게르마늄 최적처리 방법 및 흡수특성 구명을 위하여 담액수경 방식으로 정식 후 1회 양액 내 처리, 양액 내 분할처리 및 양액 내 수확 전 처리하여 처리방법별 생장반응특성과 게르마늄 흡수특성을 비교 검토하였다. 게르마늄 처리방법에 따른 게르마늄 종류 및 농도별 생육특성은 유기 게르마늄의 전체적으로 생장반응 차이가 없었으나 무기게르마늄의 경우에는 12 mg L<sup>-1</sup>에서는 지상부와 지하부 모두 생육저해가 없었으나 24 mg L<sup>-1</sup>에서는 생육저해가 나타났으며, 정식 후 1회 처리에서 생장반응 저해현상이 두드러지게 나타났다. 게르마늄 처리에 따른 뿌리 세포형태 변화를 관찰한 결과 무기 게르마늄처리구의 경우 세포의 크기가 매우 작고 세포수가 증가하여 매우 조밀한 형태를 보이고 있으며 유기게르마늄의 경우에는 세포의 크기가 매우 크고 세포 수는 감소하였다.

게르마늄 처리방법에 따른 지상부의 게르마늄 함량은 무기 및 유기 게르마늄 모두 정식 후 1회 처리 > 분할 처리 > 수확 전 처리 순이었고 지하부의 경우에는 정식 직후 처리의 함량이 가장 높았으며 무기 게르마늄의 경우 분할처리 및 수확 전 처리는 비슷한 함량을 보였으나 유

기 게르마늄의 경우 분할 처리보다 오히려 수확 전 처리의 게르마늄 함량이 더 높았다. 게르마늄 처리 방법에 따른 전체 식물체내 게르마늄 흡수량은 무기 게르마늄의 경우에는 정식 후 1회 처리 및 분할처리가 비슷한 흡수량을 보였으며 수확전 처리에서는 매우 낮았으며, 유기 게르마늄의 경우에는 처리방법에 따른 큰 차이는 없었다.

따라서 게르마늄 처리방법에 따른 식물체 성장반응과 식물체내 게르마늄 분포농도, 흡수량 및 흡수율 등의 결과들을 종합적으로 비교 검토해 볼 때 무기게르마늄 및 유기게르마늄 모두 정식 후 1회 처리 및 분할 처리가 가장 효과적이었고 유기 게르마늄에 비해 무기 게르마늄이 더 효과적이었다. 게르마늄 농도에 따른 게르마늄 함량은  $24 \text{ mg L}^{-1}$ 에서 높지만 건물중량을 고려한 게르마늄의 흡수량은 농도에 따른 차이가 거의 없어  $12 \text{ mg L}^{-1}$ 을 처리하는 것이 더 효과적인 것으로 생각되었다.

## 제 4 절 게르마늄함유 기능성 채소의 안전성 및 약리효과 검증

### I. 유기 게르마늄을 함유한 상추의 단일 경구투여 독성 시험

#### 1. 시료 및 실험동물

##### 가. 실험 시료 및 실험군

유기 게르마늄을 함유하지 않은 상추와 유기 게르마늄을 함유한 상추의 분말을 식약청 고시에 명시된 최고농도인  $2,00 \text{ mg kg}^{-1}$ 을 투여량으로 산출하였고, 이 때 실험 시료에 포함된 게르마늄의 함유량은  $60 \text{ mg kg}^{-1}$ 이었다. 실험군의 구성은 암수 각각 40마리의 생쥐를 실험군간 체중이 고르게 나누어서 증류수를 투여한 대조군, 게르마늄을 함유하지 않는 상추를 투여한 실험군,  $\text{GeO}_2$ 를 함유한 상추를 투여한 실험군, Ge-132를 함유한 상추를 투여한 실험군으로 나누고 실험군 당 암수 5마리씩 배치하였다.

##### 나. 실험동물 및 사육조건

실험동물은 (주)샘타코 바이오 코리아( 경기도 오산시, 한국)에서 특정병원체부재 (specific pathogen free) C57BL/6 생쥐를 공급받아 실험동물 사육실에서 폴리카보네이트 사육상자 ( $260 \times 410 \times 20 \text{ mm}$ )당 5개체의 밀도를 유지하며 사육하였고 사육상자는 시험번호 및 동물번호를 기입한 라벨지를 부착하여 식별하였다. 이들 생쥐는 2주일간 온도  $21 \pm 2^\circ\text{C}$ , 습도  $55 \pm 10\%$ 의 환경에서 사육하였으며 사료는 (주)샘타코 바이오 코리아에서 공급받은 방사선 조사로 멸균된 실험동물용 고형사료를, 물은 여과된 멸균 정제수를 충분히 공급하고, 낮과 밤의 주기를 12시간씩 조절하면서 가능한 스트레스를 받지 않도록 사육하였으며, 생후 8주의 생쥐를 실험에 사용하였다.

#### 2. 관찰 및 검사항목

##### 가. 일반 및 임상증상 관찰

실험 기간 중 투여 당일은 8시간까지 매시간, 투여 다음날부터 14일까지 매일 1회씩 동물의 행동, 운동성, 보행 이상 외관 등에 관한 일반증상과 임상증상 및 사망 유무에 관해서 관찰하였다.

##### 나. 체중 변화

모든 동물에 대하여 투여 개시 전에 1회, 투여 개시 후에 이틀에 한 번씩 2, 4, 6, 8, 10, 12, 및 14일에 몸무게를 측정하였으며, 총 8회 체중을 측정하였다.

##### 다. 사료 및 물 섭취량

사료와 물 섭취량은 실험기간 동안 2일에 1회씩 측정했으며, 사료는 공급 전 무게와 공급 후 무게의 차이, 물은 공급 전 부피와 공급 후 부피의 차이를 측정하였다.

#### 라. 장기무게 측정

실험 종료 후 실험동물을 에테르로 마취하여 희생시키고 육안적으로 피하, 복강장기, 흉강장기 및 뇌를 관찰하였다. 무게를 측정한 장기는 뇌, 흉선, 심장, 폐, 간, 비장, 신장-좌·우, 부신-좌·우, 난소-좌·우(암컷), 정소-좌·우(수컷), 부정소-좌·우(수컷), 자궁(암컷), 전립선(수컷)이며, 무게는 육안으로 지방을 제거한 다음 측정하였으며, 일부 크기가 작은 장기(부신, 난소, 부정소)는 해부현미경으로 관찰하면서 지방을 제거한 후 무게를 측정 하였다.

#### 마. 혈액학적 분석

부검 전 20~24시간 절식시킨 생쥐의 꼬리에서 채혈하여 얻은 혈액을 EDTA tube에 넣어 항응고 처리한 후 3시간 이내에 자동 혈액 측정기 HEMAVET 850(CDC Technical, USA)를 이용하여 아래의 항목을 측정하였다. 즉 혈액 중에 포함된 백혈구(White Blood Cell, WBC) 및 호중구(Neutrophil, NE), 림프구(Lymphocyte, LY) 단핵구(Monocyte, MO) 호산구(Eosinophil, EO), 호염구(Basophil, BA)), 적혈구(Red Blood Cell, RBC)의 숫자와, 혈색소량(Hemoglobin, Hb), 적혈구 용적(Hematocrits, Hct), , 평균적혈구용적(Mean Corpuscular Volume, MCV) 평균적혈구색소량(Mean Corpuscular Hemoglobin, MCH), 평균적혈구색소농도(Mean Corpuscular Hemoglobin Concentration, MCHC), 혈소판(Platelet, PLT), 평균적혈구색소량(Mean Plasma Volume, MPV)의 값을 측정하였다.

#### 바. 혈액 생화학 분석

부검전일 20~24시간 절식시킨 생쥐의 안와에서 채혈한 혈액을 Heparin tube에 담아 원심분리(1,914g, 5분)하여 혈청을 분리하였다. 분리한 혈청은 자동생화학분석기(FUJI DRI-CHEM 3500, Japan)를 이용하여 GOT(Glutamate Oxaloacetate Transaminase), GPT(Glutamic Pyruvic Transaminase), BUN(Blood Urea Nitrogen), CRE(Creatinine), TP(Total protein), GLU(Glucose), ALB(Albumin), ALP(Alkaline Phosphatase) GGP( $\gamma$ -Grutamyltransferase), TG(Triglyceride), T-Chol(Total Cholesterol), IP(Inorganic Phosphorus), LDH(Lactate Dehydrogenase), CKMB(Creatine kinase),  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$  값을 분석하였다.

#### 사. 비장세포 증식반응 측정

유기 게르마늄 투여가 면역세포의 증식반응에 미치는 효과를 측정하기 위하여 생쥐의 비장세포를 이용하였다. 먼저 각 실험군의 생쥐 비장을 분리한 다음, 핀셋이나 메쉬를 이용하여 단일세포 부유액을 만들었다. 단일세포 부유액을 RPMI 1640 배양액으로 3회 세척한 다음,  $5 \times 10^6$  cell  $mL^{-1}$  농도가 되게 희석한 후 96 well당 100  $\mu L$  씩 첨가하였다. 이때, LPS ( $10 \mu g mL^{-1}$ ) 또는 Con A ( $\mu g mL^{-1}$ )을 첨가하여 37 $^{\circ}C$ , 5%  $CO_2$  배양기에서 72시간 배양하였다. 비장세포증식 측정은 Promega(Madison, WI, USA)제품인 Cell Titer 96<sup>R</sup> Aqueous One Solution Cell proliferation Assay를 사용하였다. 즉 세포 배양액 100  $\mu L$ 에 Cell Titer 96<sup>R</sup> Aqueous One



Solution Cell proliferation Assay 시약을 15  $\mu$ L씩 첨가하여 3시간동안 반응시킨 다음 Microplate reader (Titertek Multiscan Plus, Finland)로 490 nm에서 O.D.값을 측정하여 증식 정도를 측정하였다.

#### 아. 세포 표면분자 분석

비장 내 림프구인 B세포, 보조 T세포, 세포독성 T세포의 비율을 측정하기 위하여, 생쥐의 비장세포 ( $5 \times 10^5$ 개)를 anti-CD16/CD32 (Fc $\gamma$ III/II Receptor) mAb로 4°C에서 30분 동안 blocking하고 washing 용액 (1% FBS/0.1% NaN<sub>3</sub>/PBS)으로 세척하였다. 그리고 PE-conjugated anti-CD8 mAb 또는 FITC-conjugated anti-CD4, CD-19 mAb로 4°C에서 30분 동안 염색하였다. 염색한 세포를 다시 washing 용액으로 세척한 후, 인산완충용액에 현탁하여 유세포분석기 (Epics XL, Coulter, USA)로 분석하였다.

#### 자. 통계처리

대조군과 실험군 간의 체중변화, 사료 및 물 섭취량, 혈액검사, 혈액화학검사에 대한 실험결과는 Mean $\pm$ S.D.로 나타내었으며 대조군과 유의한 차이가 있는 실험군을 알아보기 위하여 Student t-test를 실시하였으며 유의차가 5% 미만 ( $p < 0.05$ )일 때 통계학적 유의성이 있는 것으로 판정하였다.

### 3. 시험결과

#### 가. 일반 및 임상증상 관찰

실험 전 기간 동안 사망하는 실험동물은 없었으며, 시료의 투여와 관련된 일반증상과 임상증상도 관찰되지 않았고, 부검 결과에서도 시료 투여와 관련한 어떠한 육안적 병변도 관찰되지 않았다.

#### 나. 체중 변화

실험 전 기간 동안 대조군과 시료 투여군 간의 체중 차이는 관찰되지 않았다 (Table 4-1, Fig. 4-1). 시험 시작 전에 측정된 체중은 암컷이 약 17-18 g으로 약 20 g인 수컷에 비해 적은 것으로 나타났으며 14일 간의 실험기간 동안에 유의한 체중 변화는 암컷과 수컷 모두에서 관찰되지 않았다. 그러나 실험 마지막에 측정된 체중은 암컷과 수컷, 그리고 대조군과 실험군 모두에서 약간씩 감소하는 것으로 나타났지만, 이것은 생쥐를 희생시키기 전에 24시간 절식시킨 것 때문이라고 생각된다.

Table 4-1. Changes in mean body weight (g) of female and male mice.

Groups	DW	Lettuce	Lettuce-GeO <sub>2</sub>	Lettuce-Ge <sub>132</sub>	
Female	0day	18.070±0.865	17.880±0.970	18.348±0.302	18.110±0.931
	2day	18.634±1.207	18.078±0.523	18.721±0.572	18.516±1.009
	4day	18.603±1.363	18.080±0.751	18.603±0.456	18.584±1.088
	6day	18.835±1.445	18.140±0.756	18.596±0.339	18.655±0.902
	8day	18.407±1.182	17.662±0.800	18.465±0.576	18.504±0.888
	10day	18.129±0.981	17.556±0.821	18.290±0.540	18.453±0.878
	12day	18.336±1.147	17.648±0.702	18.513±0.514	18.596±0.749
	14day	16.854±1.176	16.017±0.945	17.087±0.471	17.250±0.781
Male	0day	20.832±0.466	20.686±0.818	20.562±0.386	20.566±0.959
	2day	20.819±0.512	20.458±0.816	20.728±0.536	20.081±0.896
	4day	21.441±0.561	20.791±0.718	20.572±0.356	20.839±0.685
	6day	21.418±0.518	21.145±0.886	20.881±0.319	20.920±0.814
	8day	21.722±0.745	21.122±0.837	20.898±0.491	20.651±0.927
	10day	21.710±0.648	21.350±0.948	21.147±0.562	20.786±0.978
	12day	22.115±0.590	21.679±0.882	21.201±0.249	21.301±1.050
	14day	20.310±0.596	19.997±0.711	19.321±0.389	19.858±1.101

Changes in mean body weights of Female and male mice following single administration on Day 0 with 2,000 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce, lettuce-GeO<sub>2</sub>, or lettuce-Ge<sub>132</sub> lettuce powder, or its vehicle.

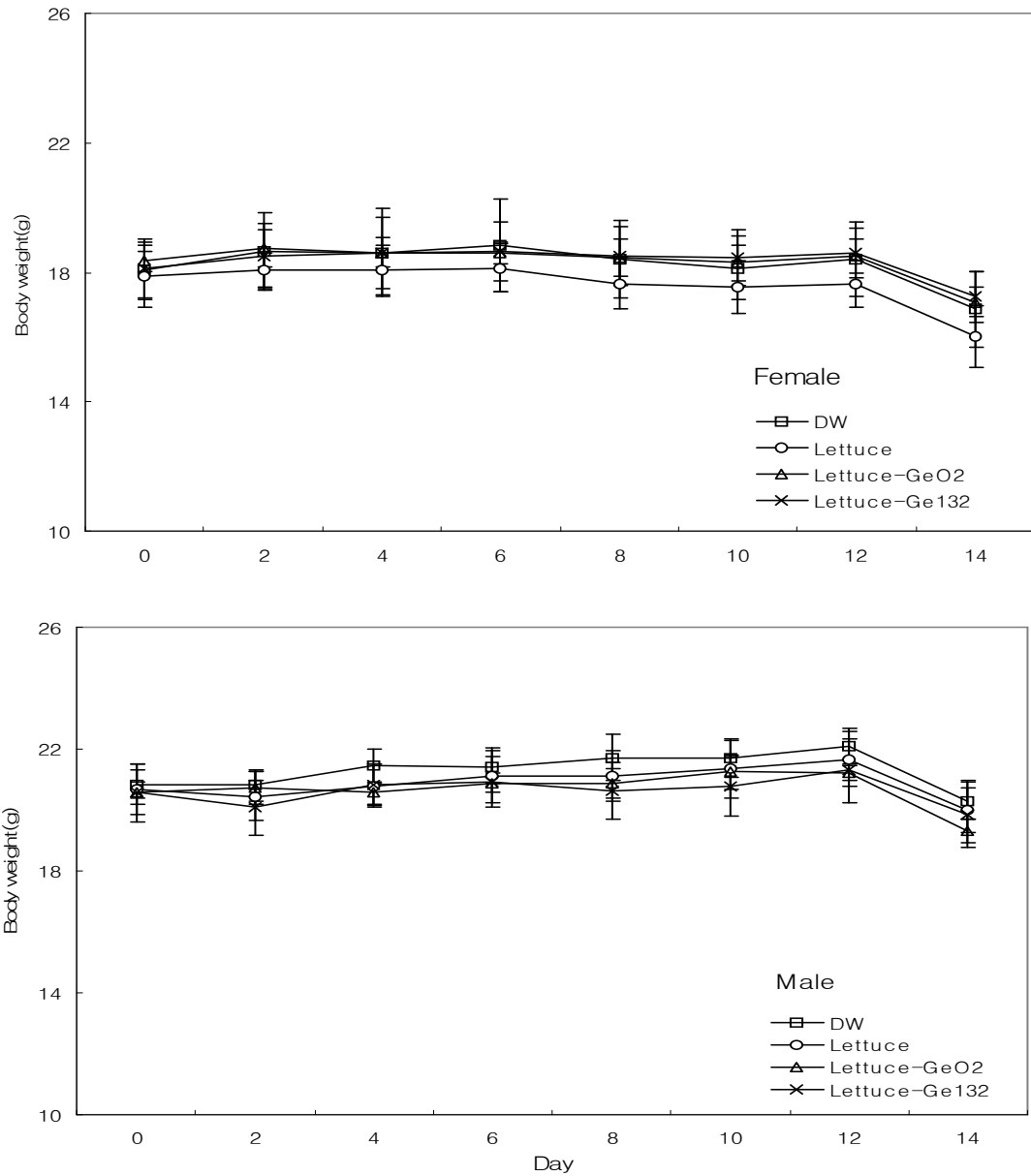


Fig. 4-1. Changes in mean body weights of female and male mice following single administration on Day 0 with 2,000 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce(○), lettuce-GeO<sub>2</sub>(△), or lettuce-Ge<sub>132</sub>(×) powder, or its vehicle(□).

#### 다. 사료 섭취량 변화

사료 섭취량은 생쥐 한 마리 당 섭취량은 측정하지 않고 5마리가 들어있는 사육상자 당 사료 섭취량을 측정하였다. 사료 섭취량도 실험기간 동안 큰 변화가 없는 것으로 나타났으며, 암컷 생쥐의 사료 소비량은 2일 동안 약 24~32g으로 약 27~36g인 수컷에 비해 적은 것으로 나타났다(Table 4-2, Fig. 4-2). 이것은 암수의 체중 차이로 인한 사료 섭취량의 차이로 생각된다.

Table 4–2. Feed consumption by female and male mice(g)

Groups	DW	Lettuce	Lettuce–GeO <sub>2</sub>	Lettuce–Ge132	
F e m a l e	2day	31.351	24.917	32.071	28.799
	4day	28.645	26.450	29.835	29.348
	6day	29.218	26.965	28.92	28.726
	8day	25.622	24.587	25.2	25.251
	10day	24.785	24.604	25.702	25.983
	12day	30.519	27.199	27.044	28.123
M a l e	2day	31.003	27.499	30.594	33.382
	4day	33.124	28.293	30.323	35.199
	6day	31.469	29.287	30.323	30.849
	8day	36.568	30.584	29.106	31.469
	10day	33.088	28.710	28.838	33.631
	12day	33.974	31.992	29.715	36.173

Feed consumption by female and male mice following single administration on Day 0 with 2,000 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce, Lettuce–GeO<sub>2</sub>, or Lettuce–Ge<sub>132</sub> of Organic–germanium lettuce powder, or its vehicle.

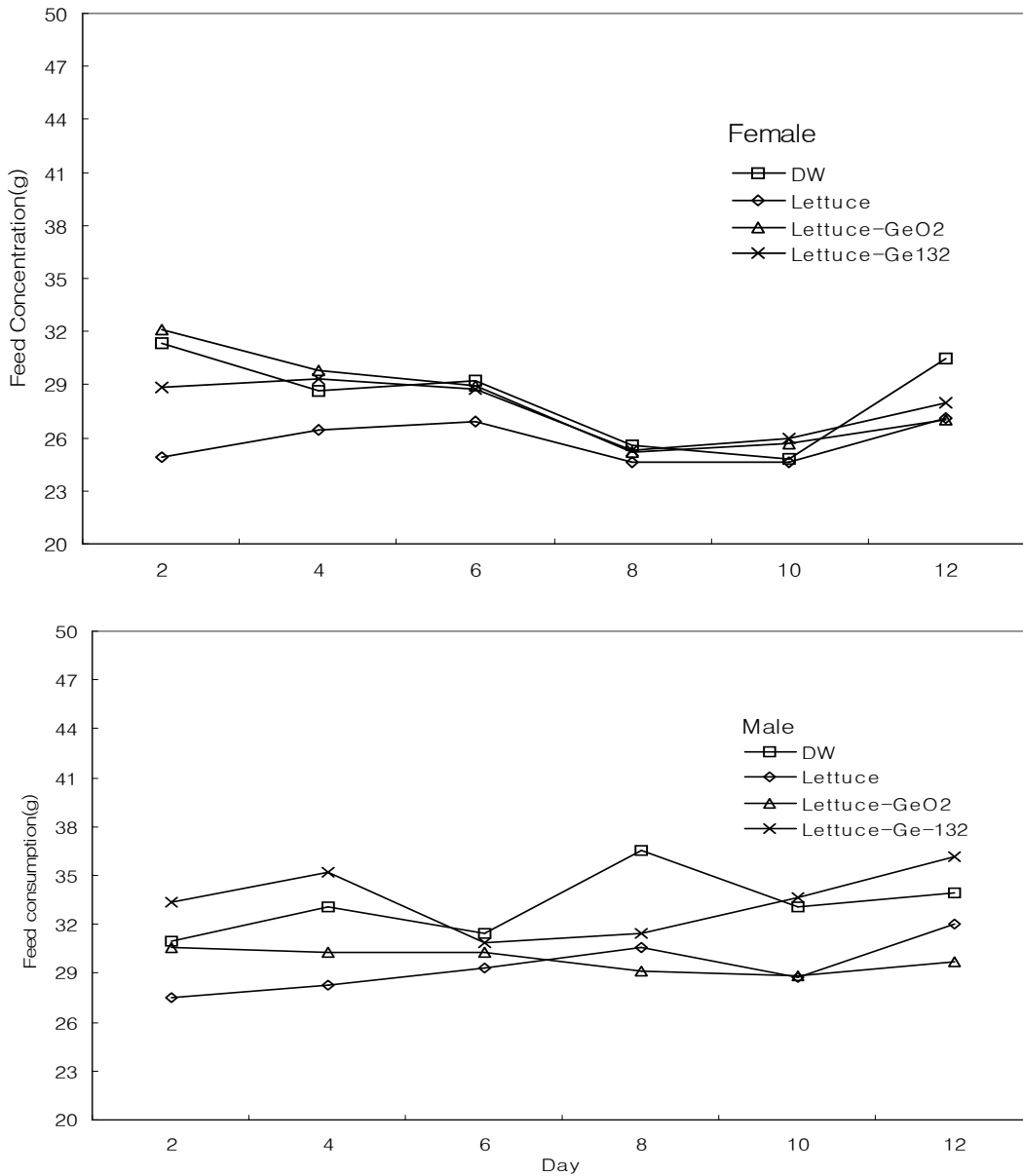


Fig. 4-2. Feed consumption by female and male mice following single administration on Day 0 with 2,000 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce(○), lettuce-GeO<sub>2</sub>(△), or lettuce-Ge<sub>132</sub>(×) powder, or its vehicle(□).

#### 라. 물 섭취량 변화

물 섭취량 역시 사료 섭취량과 같이 생쥐 한 마리 당 섭취량은 측정하지 않고 5마리가 들어 있는 사육상자 당 사료 섭취량을 측정하였다. 물 섭취량도 실험 기간 동안 큰 변화가 없는 것으로 나타났으며, 암컷 생쥐의 물 소비량은 2일 동안 약 38~45ml로 약 38~49ml인 수컷에 비해 약간 적은 것으로 나타났다(Table 4-3, Fig. 4-3). 그러나 수컷 생쥐에서 Ge<sub>132</sub>를 함유한 상추를 먹인 실험군의 실험 4일째 물 섭취량이 64ml로 측정이 되었다. 이것은 암수의 평균적인 물 섭취량에 비해 증가한 것으로, 같은 실험군의 2, 6, 8, 10, 12일째 물 섭취량(46~51ml)을 고려할 때, 갑자기 물 섭취량이 증가하였다고 생각하기보다 물병이 새거나 측정 상의 오차로 이

해하는 것이 타당하다고 생각된다.

Table 4-3. Water consumption(ml) by female and male mice.

Groups	DW	Lettuce	Lettuce-GeO <sub>2</sub>	Lettuce-Ge <sub>132</sub>	
F e m a l e	2day	42.5	40	41	43
	4day	40	38	41	43
	6day	46	40	42.5	44
	8day	45	44	41	44
	10day	40	40	40.5	44
	12day	42.5	39	40	43
M a l e	2day	49	41.5	42	51
	4day	47	36	44	64
	6day	49	41	44	46
	8day	54	43	44	50
	10day	45.5	40	38.5	46
	12day	49	46	38	48.5

Water consumption by female and male mice following single administration on Day 0 with 2,000 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce, lettuce-GeO<sub>2</sub>, or lettuce-Ge<sub>132</sub> powder, or its vehicle.

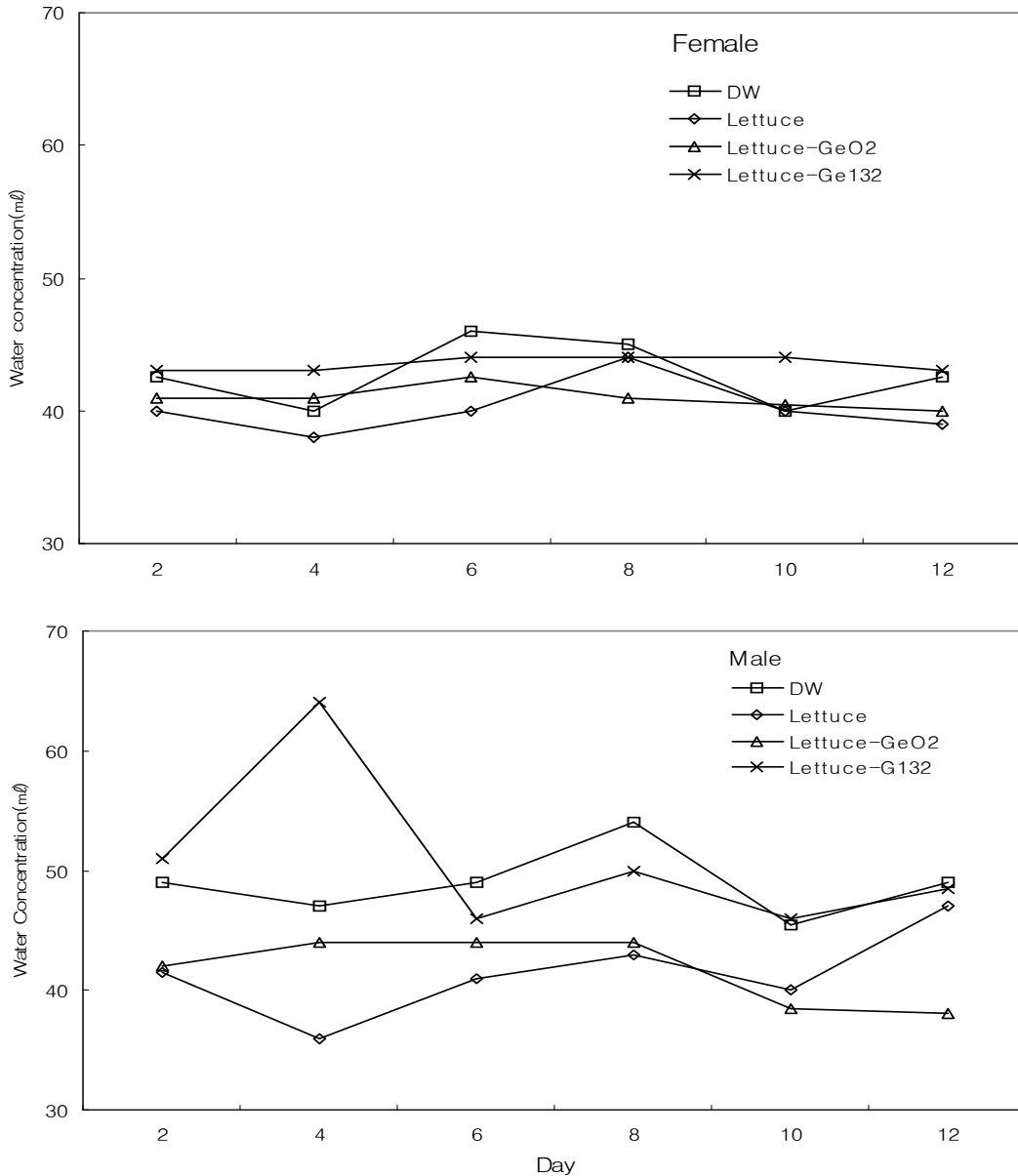


Fig. 4-3. Water consumption by female and male mice following single administration on Day 0 with 2,000 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce(○), lettuce-GeO<sub>2</sub>(△), or lettuce-Ge<sub>132</sub>(×) powder, or its vehicle(□).

마. 장기 무게 변화

각 실험군의 절대 장기 무게를 측정한 결과, 암수 각 실험군에서 대조군에 비해 실험군의 장기 무게는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다 (Table 4-4). 즉 암컷의 경우에 대조군에 비해 각 실험군의 장기 무게가 모두 약간 감소하는 경우 (흉선, 오른쪽 난소)와 약간 증가하는 경우 (왼쪽 난소)가 있었지만 유의한 차이는 아닌 것으로 나타났으며, 나머지 장기에서는 대조군에 비해 각 실험군이 증가하는 경우와 감소하는 경우 두 가지 경우가 나타났지만 이것 역시 유의한 차이는 아니었다. 수컷의 경우에도 흉선, 심장, 오른쪽 신장, 왼쪽 부정소의 무게가 대조군에 비해 모든 실험군에서 약간 감소하였지만 유의한 차이는 아니었고, 왼쪽 신장과 좌우 정소

의 무게가 약간 증가하였지만 역시 유의한 차이는 아니었다.

몸무게에 대한 상대적인 장기 무게를 비교한 결과, 대조군과 비해 실험군 간에 유의한 차이는 관찰되지 않았다 (Table 4-5). 그러나 암수 간의 몸무게에 대한 장기 무게를 비교해보면 뇌, 흉선, 심장, 허파, 간, 비장 등의 상대적 무게가 수컷에 비해 암컷이 무거운 것으로 나타났다. 이것은 같은 장기 무게의 경우에 상대적으로 암컷의 체중이 적기 때문에 생기는 결과라고 생각할 수도 있다. 그러나 왼쪽 신장의 경우에는 암컷에 비해 수컷이 무거운 것으로 나타났으며, 흉선과 같이 절대적으로 암컷의 장기가 무거운 것도 있기 때문에 암수 체중에 의한 것으로 생각할 수 없다. 다만 암수 간의 몸무게에 대한 상대적인 무게의 차이가 모두 정상적인 범위 내에 속하였기 때문에 치료 투여로 인한 결과는 아닌 것으로 판단된다.

#### 바. 혈액 생화학적 분석

혈액 생화학적 검사 결과에서 암컷의 경우에는 대조군에 비해 각 실험군의 측정값에 유의한 변화는 없는 것으로 나타났다 (Table 4-6). 그러나 수컷의 경우에는 GPT와 GOT 측정값이 대조군에 비해  $Ge_{132}$ 를 함유한 상추를 먹인 실험군에서 유의적으로 감소하였다 ( $p < 0.05$ ). 그리고 LDH 측정값이 대조군에 비해  $GeO_2$ 와  $Ge_{132}$ 를 함유한 상추를 먹인 실험군에서 각각 유의적으로 감소하였다 ( $p < 0.05$ ). 그러나 이러한 변화는 모두 정상범위 내에서 변화였으며 시험물질 투여로 인한 결과는 아닌 것으로 생각된다.

#### 사. 혈액학적 분석

혈액학적 검사에서는 암컷과 수컷 모두에서 대조군에 비해 각 실험군의 측정값에 유의한 변화는 없는 것으로 나타났다 (Table 4-7). 수컷의 혈소판 (PLT) 수치가 대조군에 비해 각 실험군이 증가한 것으로 나타났지만 유의적인 변화는 아니었다.



Table 4-4. Absolute organ weights of mice (n=5) orally administered with organic-germanium lettuce powder or its vehicle.

Sex		Male				Female		
Groups	DW	Lettuce	Lettuce-GeO <sub>2</sub>	Lettuce-Ge <sub>132</sub>	DW	Lettuce	Lett	
Brain(g)	0.4391±0.0136	0.4383±0.0114	0.4273±0.0110	0.4424±0.0094	0.4437±0.0252	0.4523±0.0501	0.43	
Thymus(g)	0.0409±0.0074	0.0379±0.0035	0.0378±0.0057	0.0403±0.0127	0.0486±0.0062	0.0473±0.0064	0.04	
Heart(g)	0.1137±0.0079	0.1100±0.0112	0.1011±0.0094	0.1039±0.0086	0.0993±0.0168	0.0897±0.0055	0.10	
Lung(g)	0.1098±0.0034	0.1080±0.0021	0.1135±0.0061	0.1180±0.0066	0.1074±0.0071	0.1149±0.0059	0.10	
Liver(g)	0.8036±0.0471	0.8096±0.0667	0.7957±0.0283	0.7702±0.0620	0.7137±0.0682	0.6860±0.0358	0.70	
Spleen(g)	0.0448±0.0045	0.0438±0.0066	0.0432±0.0031	0.0450±0.0045	0.0491±0.0029	0.0461±0.0027	0.04	
Kidneys(g)	left	0.1265±0.0062	0.1319±0.0061	0.1327±0.0094	0.1313±0.0181	0.1022±0.0107	0.0984±0.0038	0.10
	right	0.1369±0.0044	0.1278±0.0127	0.1349±0.0107	0.1358±0.0077	0.1063±0.0121	0.1024±0.0033	0.10
Adrenals(g)	left	0.0025±0.0002	0.0020±0.0003	0.0033±0.0023	0.0024±0.0009	0.0029±0.0004	0.0029±0.0004	0.00
	right	0.0020±0.0007	0.0019±0.0001	0.0046±0.0069	0.0023±0.0005	0.0024±0.0003	0.0028±0.0003	0.00
Testes(g)	left	0.0694±0.0099	0.0829±0.0056	0.0805±0.0070	0.0741±0.0030	-	-	
	right	0.0697±0.0100	0.0806±0.0029	0.0839±0.0022	0.0766±0.0044	-	-	
Epididymides (g)	left	0.0328±0.0125	0.0262±0.0040	0.0313±0.0079	0.0250±0.0025	-	-	
	right	0.0257±0.0032	0.0279±0.0048	0.0311±0.0067	0.0246±0.0026	-	-	
Prostate(g)	0.0180±0.0030	0.0179±0.0015	0.0245±0.0038	0.0187±0.0056	-	-		
Ovaries(g)	left	-	-	-	-	0.0011±0.0005	0.0015±0.0007	0.00
	right	-	-	-	-	0.0023±0.0010	0.0015±0.0007	0.00
Uterus(g)	-	-	-	-	0.0462±0.0118	0.0609±0.0227	0.04	

Values are presented as means ± S.D. for 5 mice

Table 4-5. Relative organ weights of mice(n=5) orally administered with organic-germanium lettuce powder or its vehicle.

Sex		Male				Female		
Groups		DW	Lettuce	Lettuce-GeO <sub>2</sub>	Lettuce-Ge <sub>132</sub>	DW	Lettuce	Lettuce
	Brain(g)	2.164±0.098	2.194±0.090	2.213±0.093	2.232±0.099	2.640±0.191	2.822±0.224	2.561±0.191
	Thymus(g)	0.201±0.037	0.189±0.011	0.196±0.030	0.202±0.061	0.289±0.038	0.295±0.027	0.289±0.038
	Heart(g)	0.561±0.053	0.550±0.048	0.523±0.048	0.523±0.030	0.587±0.067	0.560±0.021	0.603±0.053
	Lung(g)	0.541±0.022	0.541±0.018	0.587±0.032	0.595±0.030	0.638±0.025	0.719±0.051	0.603±0.053
	Liver(g)	3.955±0.177	4.044±0.207	4.119±0.148	3.874±0.102	4.235±0.280	4.286±0.124	4.151±0.177
	Spleen(g)	0.221±0.026	0.219±0.027	0.224±0.013	0.227±0.023	0.293±0.028	0.288±0.012	0.261±0.026
Kidneys(g)	left	0.623±0.029	0.661±0.044	0.686±0.045	0.660±0.070	0.606±0.022	0.616±0.034	0.603±0.053
	right	0.675±0.034	0.639±0.060	0.698±0.052	0.684±0.019	0.629±0.031	0.643±0.058	0.639±0.060
Adrenals(g)	left	0.012±0.001	0.010±0.001	0.017±0.012	0.014±0.005	0.017±0.002	0.018±0.003	0.017±0.002
	right	0.010±0.003	0.009±0.001	0.024±0.037	0.012±0.005	0.014±0.002	0.018±0.002	0.017±0.002
Testes(g)	left	0.342±0.052	0.414±0.020	0.416±0.030	0.375±0.035	-	-	-
	right	0.344±0.053	0.403±0.013	0.434±0.011	0.387±0.040	-	-	-
Epididymides(g)	left	0.162±0.063	0.131±0.019	0.162±0.041	0.127±0.017	-	-	-
	right	0.126±0.013	0.140±0.028	0.161±0.032	0.124±0.015	-	-	-
	Prostate(g)	0.089±0.015	0.090±0.009	0.127±0.021	0.094±0.027	-	-	-
Ovaries(g)	left	-	-	-	-	0.006±0.002	0.009±0.004	0.009±0.004
	right	-	-	-	-	0.013±0.005	0.009±0.005	0.013±0.005
	Uterus(g)	-	-	-	-	0.277±0.079	0.380±0.140	0.261±0.026

Values are presented as means ± S.D. for 5 mice

Table 4–6. Blood biochemistry of mice(n=5) orally administered with organic–germanium lettuce powder or its vehicle.

Sex	Male				Female		
Groups	DW	Lettuce	Lettuce–GeO <sub>2</sub>	Lettuce–Ge <sub>132</sub>	DW	Lettuce	Lettuce
GPT(U L <sup>-1</sup> )	64.6±29.4	70.4±21.6	35.6±2.3	29.6±3.0*	41.2±9.8	42.6±6.0	78.6±
GOT(U L <sup>-1</sup> )	192.6±60.0	203±63.2	117.8±35.7	91.8±8.8*	126.6±42.1	136.2±36.0	280.4±
ALP(U L <sup>-1</sup> )	251.8±38.6	257.6±28.0	267.2±20.2	305.8±40.4	323.4±25.5	342.4±33.9	250±
CKMB(U L <sup>-1</sup> )	300.0±0.0	300.0±0.0	274.4±57.2	300.0±0.0	269.0±69.3	278.4±48.3	300.0
GLU(mg dL <sup>-1</sup> )	161.4±29.1	168±37.6	153.8±29.2	150.2±23.3	159.8±55.5	128.6±25.9	151±
BUN(mg dL <sup>-1</sup> )	29.78±6.5	30.7±6.4	24.76±2.7	24.68±2.4	28.14±11.8	26.42±3.3	26.92
CRE(mg dL <sup>-1</sup> )	0.28±0.00	0.30±0.00	0.26±0.06	0.24±0.06	0.22±0.05	0.24±0.06	0.26±
TBIL(mg dL <sup>-1</sup> )	0.46±0.18	0.48±0.13	0.28±0.05	0.26±0.06	0.26±0.06	0.30±0.00	0.74±
TCHO(mg dL <sup>-1</sup> )	83.6±15.6	84.8±7.7	84.4±5.60	92.8±6.8	81.2±16.2	78.4±9.7	77±
TG(mg dL <sup>-1</sup> )	63.8±10.2	59.2±15.4	66.6±13.7	52.2±6.4	59±13.0	73.6±9.7	82.4±
TP(mg dL <sup>-1</sup> )	4.62±0.40	4.52±0.36	4.72±0.13	4.84±0.09	4.68±0.19	4.54±0.25	6.12±
ALB(mg dL <sup>-1</sup> )	2.50±0.29	2.30±0.16	2.46±0.15	2.50±0.07	2.50±0.16	2.54±0.13	2.68±
GGT(U L <sup>-1</sup> )	2.6±0.6	2.2±1.1	2.4±1.1	2.8±0.5	3.0±1.0	2.6±0.9	4.4±
LDH(U L <sup>-1</sup> )	586.0±269.9	539.6±159.9	265.2±16.7*	246.2±36.3*	299.0±96.1	294.0±66.4	626.8±
IP(mg dL <sup>-1</sup> )	9.84±1.10	8.88±0.67	7.88±1.34	7.54±0.65	7.62±0.82	6.62±1.60	10.10±
Ca(mg dL <sup>-1</sup> )	9.98±0.29	9.22±1.13	9.60±0.14	9.78±0.11	9.46±0.30	9.56±0.45	9.42±
Na(mEq L <sup>-1</sup> )	150.0±3.1	146.0±0.7	149.8±1.6	146.2±1.3	149.4±1.5	145.4±1.3	149.0
K(mEq L <sup>-1</sup> )	5.30±0.44	5.44±0.72	4.26±0.21	4.08±0.37	4.10±0.45	4.72±0.48	5.54±
Cl(mEq L <sup>-1</sup> )	112.6±2.1	111.6±1.8	113.4±2.1	109±1.6	112.2±1.9	110.2±1.5	113.8

Values are presented as means ± S.D. for 5 mice

\*Significant difference from male vehicle control group ( $P<0.05$ )

Table 4–7. Hematology of mice (n=5) orally administered with organic–germanium lettuce powder or its vehicle.

Sex		Male			Female			
Groups	DW	Lettuce	Lettuce–GeO <sub>2</sub>	Lettuce–Ge <sub>132</sub>	DW	Lettuce	Lett	
RBC(M $\mu\text{L}^{-1}$ )	9.337±1.093	10.301±1.313	8.725±3.854	10.043±1.483	10.110±0.760	9.700±0.903	8.2	
Hb(g dL <sup>-1</sup> )	13.780±1.786	14.290±1.059	12.500±3.375	15.460±0.470	13.760±0.688	14.120±1.375	11.	
HCT(%)	39.460±4.684	43.570±5.326	40.230±11.801	41.940±6.338	43.520±3.176	41.440±4.110	39.5	
RBC indices	MCV(fL)	42.260±0.350	42.320±0.957	42.610±1.574	39.150±8.608	43.080±1.033	42.720±0.798	49.
	MCH(pg)	14.760±1.492	13.970±0.980	13.140±1.444	15.690±2.243	16.660±1.218	14.580±0.766	13.
	MCHC(g dL <sup>-1</sup> )	34.960±3.508	33.010±2.190	30.890±3.771	37.570±5.378	31.780±2.893	34.120±2.090	26.
PLT(K $\mu\text{L}^{-1}$ )	1300.0±204.9	1436.1±121.7	1421.2±449.8	1778.0±220.1	923.4±398.6	829.6±181.7	96	
WBC(K $\mu\text{L}^{-1}$ )	11.532±4.276	7.804±2.768	8.700±3.698	10.394±2.055	10.228±4.555	11.936±2.217	14.	
WBC differential count(%)	NE(%)	15.076±3.532	16.042±4.494	12.338±3.681	12.179±2.728	16.192±3.909	15.832±4.512	11.
	LY(%)	81.591±3.833	79.755±6.318	82.328±4.290	84.251±3.152	77.756±6.055	80.564±5.222	81.
	MO(%)	2.648±0.715	2.719±0.728	2.817±0.801	2.861±0.576	4.556±2.129	2.680±0.725	3.5
	EO(%)	0.519±0.561	1.108±1.459	1.119±1.514	0.553±0.532	1.270±0.615	0.704±0.479	2.4
	BA(%)	0.165±0.194	0.380±0.477	0.498±0.631	0.152±0.208	0.232±0.201	0.220±0.174	0.9

Values are presented as means ± S.D. for 5 mice

#### 아. 림프구 증식반응

시료 투여에 따른 림프구의 증식반응 변화를 관찰하기 위하여 대조군과 실험군의 생쥐에서 분리한 비장세포를 이용하였다. 비장세포 중에서 B세포를 특이적으로 자극하는 LPS와, T세포를 특이적으로 자극하는 Con A로 증식반응을 유도한 다음 흡광도로 증식반응을 측정하였다. 서로의 증식반응 정도를 비교하기 위하여 LPS 또는 Con A를 첨가하였을 때 얻은 측정값을 무처리한 대조군의 측정값으로 나누어서 그 비율을 비교하였다.

먼저 암컷의 경우에 LPS 자극에 대한 증식반응이 대조군 약 2.4~4.0인 것에 비해 실험군 약 2.1~4.1로 유의한 차이는 나타나지 않았다(Table 4-8, Fig. 4-4). 그리고 Con A 자극에 대한 증식반응도 대조군 약 2.2~3.0인 것에 비해 실험군 약 1.9~3.1로 유의한 차이는 관찰되지 않았다.

수컷의 경우에도 LPS 자극에 대한 증식반응이 대조군 약 2.2~3.5인 것에 비해 실험군 약 1.7~3.5로 유의한 차이는 나타나지 않았다(Table 4-9, Fig. 4-5). 그리고 Con A 자극에 대한 증식반응도 대조군 약 2.4~3.0인 것에 비해 실험군 약 1.7~3.3로 유의한 차이는 관찰되지 않았다. 그리고 암컷과 수컷 사이의 유의한 변화도 없는 것으로 판단된다.

#### 자. 림프구 비율

시료 투여에 따른 림프구의 변화를 관찰하기 위하여 대조군과 실험군의 생쥐에서 분리한 비장세포를 이용하였다. 비장세포 중에서 B세포는 특이적 세포막 단백질인 CD19에 대한 항체를 이용하였고, T세포 중에서 보조 T세포는 특이적 세포막 단백질인 CD4에 대한 항체를 이용하였고, 세포독성 T세포는 특이적 세포막 단백질인 CD8에 대한 항체를 이용하여 그 비율을 측정하였다.

먼저 암컷의 경우에 B세포는 비장세포 중에서 그 비율이 대조군과 실험군에서 약 47.8~59.6%로 유의한 차이는 관찰되지 않았다(Table 4-10, Fig. 4-6). 그리고 보조 T세포의 비율도 평균적으로 약 23~25%, 세포독성 T세포의 비율도 평균적으로 약 13~14%로 각 실험군 간의 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.

수컷의 경우에도 비장세포 중에서 B세포의 비율이 대조군과 실험군에서 평균적으로 약 50~51%로 유의한 차이는 관찰되지 않았다(Table 4-10, Fig. 4-6). 그리고 보조 T세포의 비율도 평균적으로 약 23~25%, 세포독성 T세포의 비율도 평균적으로 약 14~15%로 각 실험군 간의 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 앞에서 관찰한 LPS와 Con A 자극에 대한 B세포와 T세포의 증식반응에서 각 실험군 간의 유의한 차이가 나타나지 않은 결과와 일치한다고 생각된다. 즉 LPS와 Con A 자극에 반응하는 세포수에 차이가 없기 때문에 증식반응에도 유의한 차이가 없는 것으로 판단된다.

이상의 결과로  $\text{GeO}_2$ 와  $\text{Ge}_{132}$ 를 함유한 상추 분말을 식약청 고시에 명시된 최고농도인  $2,000 \text{ mg kg}^{-1}$ 을 단회 경구 투여하였을 때, 시료와 관련된 특기할만한 독성증상이 관찰되지 않았다.

Table 4–8. The effects of LPS and Con A on the proliferation of female mice spleen cells

Groups	(–)	LPS(10 $\mu\text{g mL}^{-1}$ )	Con A(1 $\mu\text{g mL}^{-1}$ )	
DW	Mouse1	1.000	2.913	2.847
	Mouse2	1.000	4.041	2.478
	Mouse3	1.000	2.399	2.231
	Mouse4	1.000	3.107	2.911
	Mouse5	1.000	3.267	3.001
	Mean $\pm$ SD	1.000 $\pm$ 0.000	3.145 $\pm$ 0.598	2.693 $\pm$ 0.326
Lettuce	Mouse1	1.000	4.101	2.468
	Mouse2	1.000	3.884	2.919
	Mouse3	1.000	3.169	2.448
	Mouse4	1.000	2.470	2.287
	Mouse5	1.000	2.926	2.217
	Mean $\pm$ SD	1.000 $\pm$ 0.000	3.310 $\pm$ 0.675	2.468 $\pm$ 0.273
Lettuce–GeO <sub>2</sub>	Mouse1	1.000	2.562	2.279
	Mouse2	1.000	2.682	2.499
	Mouse3	1.000	2.932	2.675
	Mouse4	1.000	3.154	2.324
	Mouse5	1.000	2.108	1.912
	Mean $\pm$ SD	1.000 $\pm$ 0.000	2.688 $\pm$ 0.396	2.338 $\pm$ 0.284
Lettuce–Ge <sub>132</sub>	Mouse1	1.000	2.464	2.238
	Mouse2	1.000	2.971	3.064
	Mouse3	1.000	2.308	2.249
	Mouse4	1.000	3.383	2.434
	Mouse5	1.000	2.695	2.522
	Mean $\pm$ SD	1.000 $\pm$ 0.000	2.764 $\pm$ 0.426	2.501 $\pm$ 0.336

The spleen cells( $5\times 10^5$  cells well<sup>-1</sup>) of female mice following single administration on Day 0 with 2,000 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce , lettuce, lettuce–GeO<sub>2</sub>, or lettuce–Ge<sub>132</sub> or its vehicle were stimulated LPS(10  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ) or Con A(1  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ) for 48 hours.

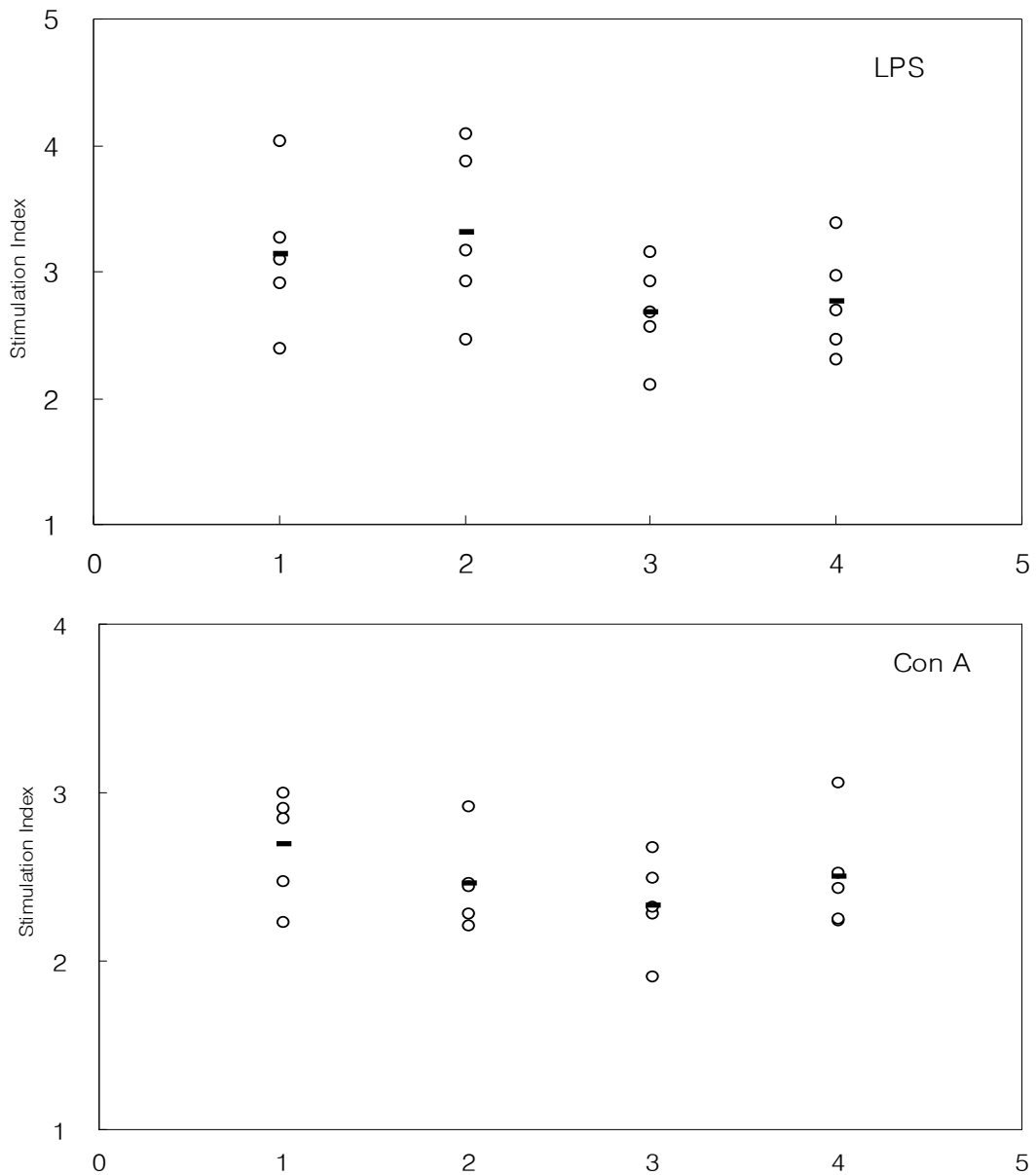


Fig. 4-4. The effects of LPS and Con A on the proliferation of female mice spleen cells. The spleen cells( $5 \times 10^5$  cells well<sup>-1</sup>) of female mice following single administration on Day 0 with 2,000 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce , lettuce(2), lettuce-GeO<sub>2</sub>(3), or lettuce-Ge<sub>132</sub>(4) or its vehicle(1) were stimulated LPS(10 μg mL<sup>-1</sup>) or Con A(1 μg mL<sup>-1</sup>) for 48 hours.

Table 4-9. The effects of LPS and ConA on the proliferation of male mice spleen cells.

Groups	(-)	LPS(10 $\mu\text{g mL}^{-1}$ )	Con A(1 $\mu\text{g mL}^{-1}$ )	
DW	Mouse1	1.000	3.460	2.762
	Mouse2	1.000	2.409	2.715
	Mouse3	1.000	2.671	3.020
	Mouse4	1.000	2.186	2.406
	Mouse5	1.000	2.257	2.390
	Mean $\pm$ SD	1.000 $\pm$ 0.000	2.597 $\pm$ 0.517	2.659 $\pm$ 0.264
Lettuce	Mouse1	1.000	1.951	2.116
	Mouse2	1.000	2.548	2.462
	Mouse3	1.000	3.215	3.094
	Mouse4	1.000	1.592	1.737
	Mouse5	1.000	2.655	2.732
	Mean $\pm$ SD	1.000 $\pm$ 0.000	2.392 $\pm$ 0.633	2.428 $\pm$ 0.257
Lettuce-G eO <sub>2</sub>	Mouse1	1.000	3.524	3.346
	Mouse2	1.000	2.542	2.781
	Mouse3	1.000	2.929	3.073
	Mouse4	1.000	2.744	2.840
	Mouse5	1.000	2.630	2.778
	Mean $\pm$ SD	1.000 $\pm$ 0.000	2.874 $\pm$ 0.391	2.964 $\pm$ 0.245
Lettuce-G e <sub>132</sub>	Mouse1	1.000	2.138	2.512
	Mouse2	1.000	2.183	2.266
	Mouse3	1.000	2.282	2.237
	Mouse4	1.000	2.120	2.398
	Mouse5	1.000	1.682	2.311
	Mean $\pm$ SD	1.000 $\pm$ 0.000	2.081 $\pm$ 0.231	2.345 $\pm$ 0.111

The spleen cells( $5 \times 10^5$  cells well<sup>-1</sup>) of male mice following single administration on Day 0 with 2,000 mg kg<sup>-1</sup> lettuce(2), lettuce-GeO<sub>2</sub>(3), lettuce-Ge<sub>132</sub>(4) or its vehicle(1) were stimulated LPS(10  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ) or Con A(1  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ) for 48 hours.



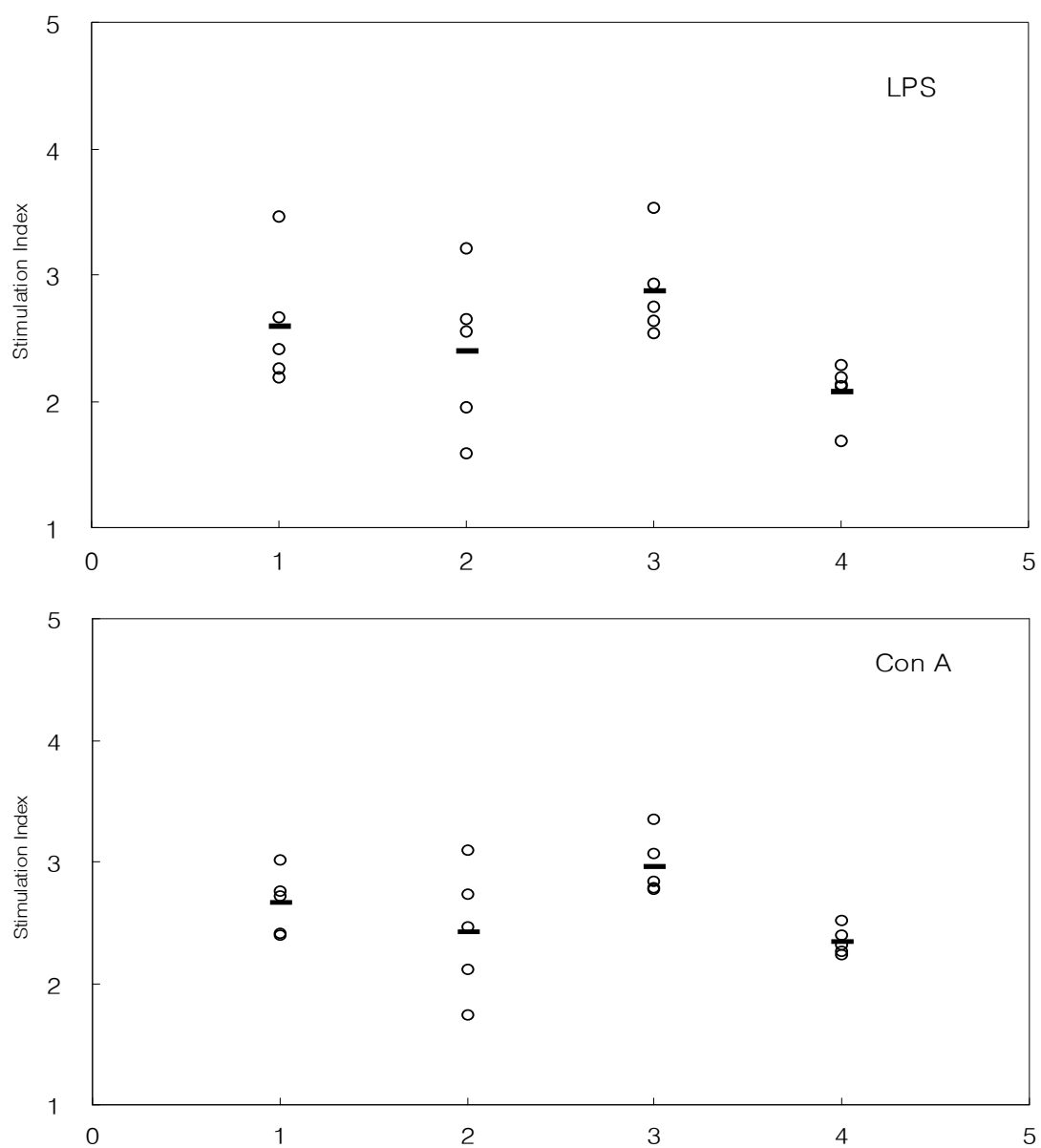


Fig. 4-5. The effects of LPS and Con A on the proliferation of male mice spleen cell. The spleen cells( $5 \times 10^5$  cells well<sup>-1</sup>) of male mice following single administration on Day 0 with 2,000 mg kg<sup>-1</sup> lettuce(2), lettuce-GeO<sub>2</sub>(3), lettuce-Ge<sub>132</sub>(4) or its vehicle(1) were stimulated LPS(10 μg mL<sup>-1</sup>) or Con A(1 μg mL<sup>-1</sup>) for 48 hours.

Table 4–10. Expression of various surface marker on the spleen cells.

Groups	Male			Female			
	CD19(%)	CD4(%)	CD8(%)	CD19(%)	CD4(%)	CD8(%)	
DW	Mouse1	50.5	24.8	15.8	51	25.6	14.5
	Mouse2	52.7	23	13.8	48.7	26.2	16
	Mouse3	48	25	16.1	47.8	25.9	14.4
	Mouse4	53.2	22.9	11.6	49.8	26.5	14.9
	Mouse5	50.6	–	16.3	51.9	24.5	12.7
	Mean±SD	51.0±2.1	23.9±1.1	14.7±2.0	49.9±1.6	25.7±0.7	14.5±1.2
Lettuce	Mouse1	54	24.2	15.9	54.6	21.3	12.7
	Mouse2	50.2	24.1	15.2	53.8	23.1	12.9
	Mouse3	54	26.1	14.9	50.6	23.8	13.2
	Mouse4	51.1	23.6	14.3	52	22.6	12.5
	Mouse5	44.3	27.7	18.9	60.4	25.2	14.9
	Mean±SD	50.7±4.0	25.1±1.7	15.8±1.8	54.3±3.8	23.2±1.4	13.2±1.0
Lettuce –GeO <sub>2</sub>	Mouse1	50.4	25.3	15.6	59.6	20.6	14.1
	Mouse2	52.8	22.5	15.1	55	21.8	15.5
	Mouse3	50.4	23.5	15.4	56.2	25.4	13.8
	Mouse4	50.1	25.8	15.2	52.4	22.5	15.3
	Mouse5	50.3	24.7	16.2	55.2	24.9	15.5
	Mean±SD	50.8±1.1	24.4±1.4	15.5±0.4	55.7±2.6	23.0±2.1	14.8±0.8
Lettuce –Ge <sub>132</sub>	Mouse1	52.2	24.2	13.1	54.2	22.3	12.9
	Mouse2	49.5	25.2	14.4	52.9	24.4	13.5
	Mouse3	51.5	23.4	15.7	50.7	22.5	14.9
	Mouse4	50.9	23.6	12.5	48.7	24.6	16.6
	Mouse5	54.5	19.9	15.1	48.2	22.5	16.1
	Mean±SD	51.7±1.8	23.3±2.0	14.2±1.3	50.9±2.6	23.3±1.1	14.8±1.6

Surface expression of CD19, CD4, CD8 of spleen cells were analyzed by one colour flow cytometry. Number represent the percentage of single positive cells.

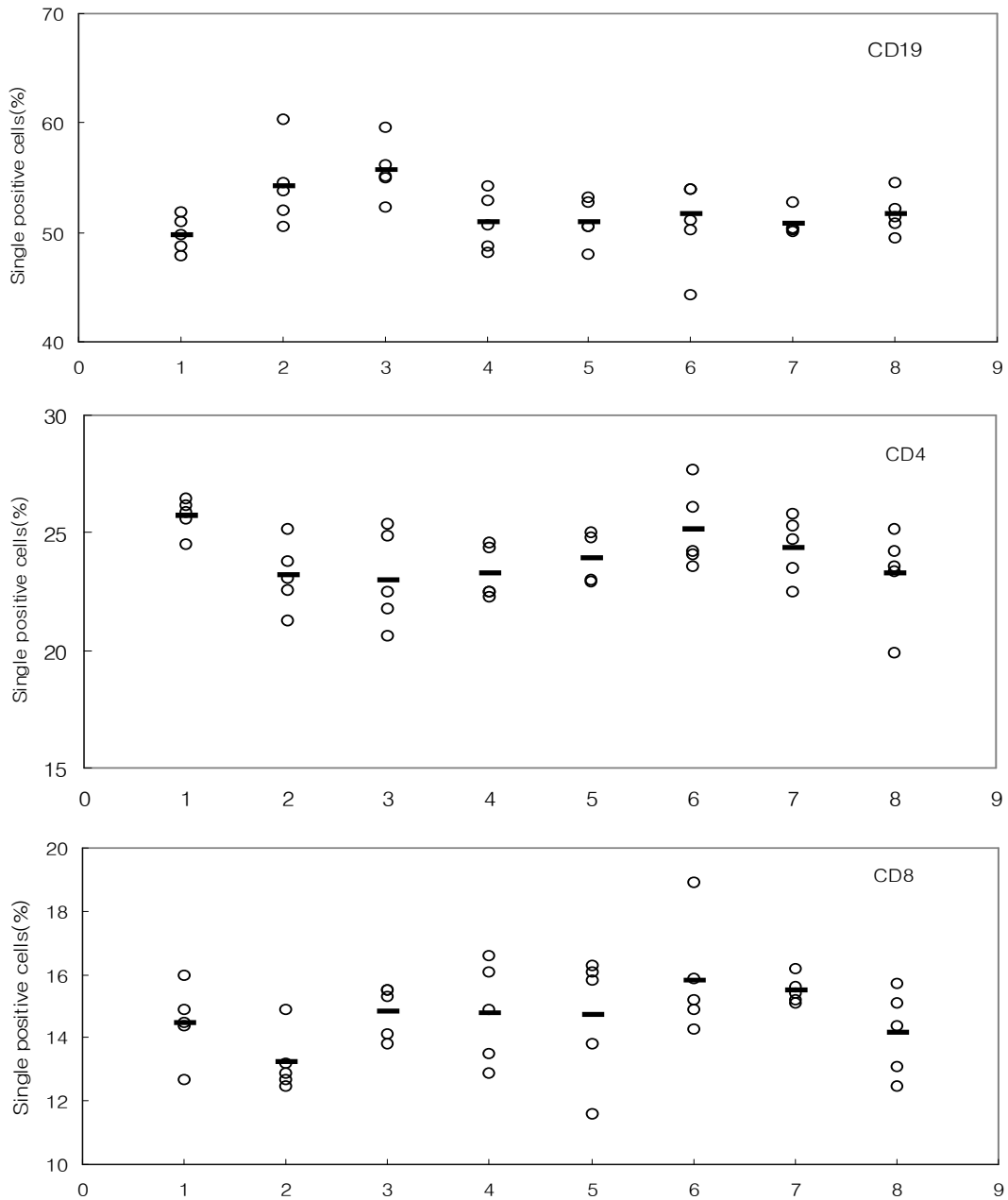


Fig. 4-6. Expression of various surface marker on the mice spleen cells. Surface expression of CD19, CD4, CD8 of spleen cells were analyzed by one colour flow cytometry. Number represent the percentage of single positive cells.

\*Male - 1:DW, 2:lettuce, 3:lettuce-GeO<sub>2</sub>, 4:lettuce-Ge<sub>132</sub>

\*Female - 5:DW, 6:lettuce, 7:lettuce-GeO<sub>2</sub>, 8:lettuce-Ge<sub>132</sub>

#### 4. 연구결과 요약

유기게르마늄과 무기게르마늄을 첨가하여 양액 재배한 상추의 안전성을 평가하기 위하여 게르마늄 함유 상추의 생쥐(C57BL/6)에 대한 단회 경구 독성시험을 수행하였다. 실험 전 기간 동안 사망한 실험동물은 없었으며, 일반증상과 임상증상도 관찰되지 않았고, 부검 결과 어떠한 육안적

병변도 관찰되지 않았다. 그리고 대조군과 시료 투여군 간의 체중 차이도 관찰되지 않았다. 암컷의 사료 소비량과 물 섭취량은 수컷에 비해 약간 적은 것으로 나타났다. 암컷의 경우에 대조군에 비해 각 실험군의 장기 무게가 모두 약간 감소하는 경우(흉선, 오른쪽 난소)와 약간 증가하는 경우(왼쪽 난소)가 있었고, 수컷의 경우에도 흉선, 심장, 오른쪽 신장, 왼쪽 부고환의 무게가 대조군에 비해 모든 실험군에서 약간 감소하였지만 유의한 차이는 아니었고, 왼쪽 신장과 좌우 고환의 무게가 약간 증가하였지만 역시 유의한 차이는 아니었다. 암수 간의 몸무게에 대한 상대적인 장기 무게의 차이는 모두 정상적인 범위 내에 속하였다. 혈액 생화학적 검사 결과, 수컷의 경우에는 GPT와 GOT 측정값이 대조군에 비해  $Ge_{132}$ 를 함유한 상추를 먹인 실험군에서 유의적으로 감소하였고, LDH 측정값이 대조군에 비해 실험군에서 각각 유의적으로 감소하였다. 혈액학적 검사에서는 수컷의 혈소판(PLT) 수치가 대조군에 비해 각 실험군이 증가한 것으로 나타났지만 유의적인 변화는 아니었다. LPS와 Con A 자극에 대해 비장세포의 증식 반응과, 비장세포 내 B세포, 보조 T세포, 세포독성 T세포의 비율은 유의한 차이가 없었다. 이상의 실험 결과로  $GeO_2$ 와  $Ge_{132}$  ( $60 \text{ mg kg}^{-1}$ )를 함유한 상추 분말을 식약청 고시에 명시된 최고농도인  $2,000 \text{ mg kg}^{-1}$ 을 단회 경구 투여하였을 때, 시료와 관련된 특기할만한 독성증상이 관찰되지 않았다.

## II. 유기 게르마늄을 함유한 상추의 반복 경구투여 독성 시험

### 1. 시료 및 실험동물

#### 가. 실험 시료 및 실험군

유기 게르마늄을 함유하지 않은 상추와 유기 게르마늄을 함유한 상추의 분말을  $500 \text{ mg kg}^{-1}$ 을 투여량으로 산출하여 증류수  $400 \mu\text{L}$ 에 희석하여 매일 13주간 경구 투여하였다. 이 때 실험 시료에 포함된 게르마늄의 함유량은  $60 \text{ mg kg}^{-1}$ 이었다. 실험군의 구성은 암수 각각 48마리의 생쥐를 실험군간 체중이 고르게 나누어서 증류수를 투여한 대조군, 게르마늄을 함유하지 않는 상추를 투여한 실험군,  $\text{GeO}_2$ 를 함유한 상추를 투여한 실험군,  $\text{Ge}_{132}$ 를 함유한 상추를 투여한 실험군으로 나누고 실험군 당 암수 6마리씩 배치하였다.

#### 나. 실험동물 및 사육조건

실험동물은 (주)샘타코 바이오 코리아(경기도 오산시, 한국)에서 특정병원체부재(specific pathogen free) C57BL/6 생쥐를 공급받아 실험동물 사육실에서 폴리카보네이트 사육상자 ( $260 \times 410 \times 20 \text{ mm}$ )당 6개체의 밀도를 유지하며 사육하였고 사육상자는 시험번호 및 동물번호를 기입한 라벨지를 부착하여 식별하였다. 이들 생쥐는 2주일간 온도  $21 \pm 2^\circ\text{C}$ , 습도  $55 \pm 10\%$ 의 환경에서 사육하였으며 사료는 (주)샘타코 바이오 코리아에서 공급받은 방사선 조사로 멸균된 실험동물용 고형사료를, 물은 여과된 멸균 정제수를 충분히 공급하고, 낮과 밤의 주기를 12시간씩 조절하면서 가능한 스트레스를 받지 않도록 사육하였으며, 생후 8주의 생쥐를 실험에 사용하였다.

### 2. 관찰 및 검사항목

#### 가. 일반 및 임상증상 관찰

실험 기간 중 투여 당일은 8시간까지 매시간, 투여 다음날부터 3주까지 매일 1회씩 동물의 행동, 운동성, 보행 이상 외관 등에 관한 일반증상과 임상증상 및 사망 유무에 관해서 관찰하였다.

#### 나. 체중 변화

모든 동물에 대하여 투여 개시 전에 1회, 투여 개시 후에 1주일에 한 번씩 13주간 몸무게를 측정하였으며, 총 14회 체중을 측정하였다.

#### 다. 사료 및 물 섭취량

사료와 물 섭취량은 실험기간 동안 1주일에 1회씩 측정했으며, 사료는 공급 전 무게와 공급 후 무게의 차이, 물은 공급 전 부피와 공급 후 부피의 차이를 측정하였다. 각 측정값은 사육상자 당 측정된 값을 생쥐의 수로 나누어 한 마리당 사료와 물 섭취량으로 계산하였다.

#### 라. 장기무게 측정

실험 종료 후 실험동물을 에테르로 마취하여 희생시키고 육안적으로 피하, 복강장기, 흉강장기 및 뇌를 관찰하였다. 무게를 측정한 장기는 뇌, 흉선, 심장, 폐, 간, 비장, 신장-좌·우, 부신-좌·우, 난소-좌·우(암컷), 정소-좌·우(수컷), 부정소-좌·우(수컷), 자궁(암컷), 전립선(수컷)이며, 무게는 육안으로 지방을 제거한 다음 측정하였으며, 일부 크기가 작은 장기(부신, 난소, 부정소)는 해부현미경으로 관찰하면서 지방을 제거한 후 무게를 측정 하였다.

#### 마. 혈액학적 분석

부검 전 20~24시간 절식시킨 생쥐의 꼬리에서 채혈하여 얻은 혈액을 EDTA tube에 넣어 항응고 처리한 후 3시간 이내에 자동 혈액 측정기 HEMAVET 850(CDC Technical, USA)를 이용하여 아래의 항목을 측정하였다. 즉 혈액 중에 포함된 백혈구(White Blood Cell, WBC) 및 호중구(Neutrophil, NE), 림프구(Lymphocyte, LY) 단핵구(Monocyte, MO) 호산구(Eosinophil, EO), 호염구(Basophil, BA)), 적혈구(Red Blood Cell, RBC)의 숫자와, 혈색소량(Hemoglobin, Hb), 적혈구 용적(Hematocrits, Hct), , 평균적혈구용적(Mean Corpuscular Volume, MCV) 평균적혈구색소량(Mean Corpuscular Hemoglobin, MCH), 평균적혈구색소농도(Mean Corpuscular Hemoglobin Concentration, MCHC), 혈소판(Platelet, PLT), 평균적혈구색소량(Mean Plasma Volume, MPV)의 값을 측정하였다.

#### 바. 혈액 생화학 분석

부검전일 20~24시간 절식시킨 생쥐의 안와에서 채혈한 혈액을 Heparin tube에 담아 원심분리(1,914g, 5분)하여 혈청을 분리하였다. 분리한 혈청은 자동생화학분석기(FUJI DRI-CHEM 3500, Japan)를 이용하여 GOT(Glutamate Oxaloacetate Transaminase), GPT(Glutamic Pyruvic Transaminase), BUN(Blood Urea Nitrogen), CRE(Creatinine), TP(Total protein), GLU(Glucose), ALB(Albumin), ALP(Alkaline Phosphatase) GGP( $\gamma$ -Grutamyltransferase), TG(Triglyceride), T-Chol(Total Cholesterol), IP(Inorganic Phosphorus), LDH(Lactate Dehydrogenase),  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$  값을 분석하였다.

#### 사. 비장세포 증식반응 측정

유기 게르마늄 투여가 면역세포의 증식반응에 미치는 효과를 측정하기 위하여 생쥐의 비장세포를 이용하였다. 먼저 각 실험군의 생쥐 비장을 분리한 다음, 핀셋이나 메쉬를 이용하여 단일세포 부유액을 만들었다. 단일세포 부유액을 RPMI 1640 배양액으로 3회 세척한 다음,  $5 \times 10^6$  cell mL 농도가 되게 희석한 후 96 well당 100  $\mu$ L 씩 첨가하였다. 이때, LPS ( $10 \mu$ g mL<sup>-1</sup>) 또는 Con A ( $1 \mu$ g mL<sup>-1</sup>)을 첨가하여 37°C, 5% CO<sub>2</sub> 배양기에서 72시간 배양하였다. 비장세포증식 측정은 Promega (Madison, WI, USA)제품인 Cell Titer 96<sup>R</sup> Aqueous One Solution Cell proliferation Assay를 사용하였다. 즉 세포 배양액 100  $\mu$ L에 Cell Titer 96<sup>R</sup> Aqueous One

Solution Cell proliferation Assay 시약을 15  $\mu\text{L}$ 씩 첨가하여 3시간동안 반응시킨 다음 Microplate reader(Titertek Multiscan Plus, Finland)로 490 nm에서 흡광도 값을 측정하여 증식 정도를 측정하였다.

#### 아. 세포 표면분자 분석

비장 내 림프구인 B세포, 보조 T세포, 세포독성 T세포의 비율을 측정하기 위하여, 생쥐의 비장세포( $5 \times 10^5$ 개)를 anti-CD16/CD32(Fc $\gamma$ III/II Receptor) mAb로 4°C에서 30분 동안 blocking하고 washing 용액(1% FBS/0.1% NaN<sub>3</sub>/PBS)으로 세척하였다. 그리고 PE-conjugated anti-CD8 mAb 또는 FITC-conjugated anti-CD4, CD-19 mAb로 4°C에서 30분 동안 염색하였다. 염색한 세포를 다시 washing 용액으로 세척한 후, 인산완충용액에 현탁하여 유세포분석기(Epics XL, Coulter, USA)로 분석하였다.

#### 자. 복수압에 대한 종양억제 효과측정

생쥐를 실험군 당 각 10마리씩 배치한 후 4주 동안 매일 유기게르마늄 농도가 500 mg kg<sup>-1</sup>이 되도록 상추를 경구 투여하였다. 투여한지 4주 후에 S-180종양세포  $3 \times 10^6$ 개를 생리식염수 300  $\mu\text{L}$ 에 현탁하여 생쥐 복강에 투여하였다. 항종양 효과는 생존일수중앙치(MST)와 연명률(ILS)로 평가하였다.

MST: mean survival time

$$\text{ILS(Increase in MST over control)} = \frac{\text{Test group MST}}{\text{Control group MST} - 1} \times 100$$

#### 차. 통계처리

대조군과 실험군 간의 체중변화, 사료 및 물 섭취량, 혈액검사, 혈액화학검사에 대한 실험결과는 Mean $\pm$ S.D.로 나타내었으며 대조군과 유의한 차이가 있는 실험군을 알아보기 위하여 Student *t*-test를 실시하였으며 유의차가 5% 미만( $p < 0.05$ )일 때 통계학적 유의성이 있는 것으로 판정하였다.

### 3. 실험결과

#### 가. 일반 및 임상증상 관찰

시료를 투여하는 13주 동안 사망하는 실험동물은 없었으며, 시료의 투여와 관련된 일반증상과 임상증상도 관찰되지 않았고, 부검 결과에서도 시료 투여와 관련한 어떠한 육안적 병변도 관찰되지 않았다.

#### 나. 체중 변화

실험 전 기간 동안 대조군과 시료 투여군 간의 유의한 체중 차이는 관찰되지 않았다(Table

4-11, Fig. 4-7). 실험 시작 전에 측정된 체중은 암컷이 약 16~18g으로 약 20~21g인 수컷에 비해 약간 적은 것으로 나타났으며, 13주간의 실험기간 동안에 암컷은 약 22~23g, 수컷은 약 25~26g으로 증가하였다. 암컷은 약 4~7g으로 증가하는 것으로 나타나 체중 증가율이 약 122~143%였고, 수컷은 약 4~6g으로 증가하여 체중 증가율이 약 119~130%로 암컷에 비해 약간 적은 것으로 나타났다.

#### 다. 사료 섭취량 변화

사료 섭취량은 생쥐가 6마리씩 들어있는 사육상자 당 일주일 동안의 사료 섭취량을 측정하여 생쥐의 수로 나누어 나타내었다(Table 4-12, Fig. 4-8). 사료 섭취량도 실험기간인 13주 동안 암수 모두에서 대조군과 각 실험군 간의 유의한 차이는 없는 것으로 나타났으며, 암컷의 사료 소비량은 일주일 동안 약 18~22g으로 약 19~25g인 수컷에 비해 약간 적은 것으로 나타났다. 대조군과 실험군 간의 사료 섭취량 차이가 없는 것은 체중 변화에 유의한 차이가 없는 결과와 일치하는 것으로 생각된다.

#### 라. 물 섭취량 변화

물 섭취량 역시 사료 섭취량과 같이 생쥐가 6마리씩 들어있는 사육상자 당 일주일 동안의 물 섭취량을 측정하여 생쥐의 수로 나누어 측정하였다(Table 4-13, Fig. 4-9). 물 섭취량도 실험 기간 13주 동안 대조군과 각 실험군 간에 큰 변화가 없는 것으로 나타났으며, 암컷 생쥐의 물 소비량은 약 22~28ml로 약 25~34ml인 수컷에 비해 약간 적은 것으로 나타났다. 암컷의 경우 매주 각 실험군 간의 물 섭취량의 차이는 약 1~4ml로 차이가 적은데 비해, 수컷은 약 2~6ml로 측정되었다. 그러나 이러한 차이는 일주일간의 물 소비량의 차이로서, 각 실험군 간의 차이라고 생각하기보다 측정 상의 오차로 이해하는 것이 타당하다고 생각된다.

#### 마. 장기 무게 변화

각 실험군의 절대 장기 무게를 측정한 결과, 암수 각 실험군에서 대조군에 비해 실험군의 장기 무게는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다(Table 4-14). 즉 암컷과 수컷의 경우에 대조군에 비해 각 실험군이 증가하는 경우와 감소하는 경우 두 가지 경우가 있었지만 이것 역시 유의한 차이는 아니었다. 흉선의 경우에 암컷의 평균적인 무게가 수컷에 비해 약간 무거운 것으로 나타났고, 심장과 좌우 신장의 무게는 암컷에 비해 수컷의 경우에 약간 무거운 것으로 나타났다.

몸무게에 대한 상대적인 장기 무게를 비교한 결과, 암수 모두에서 대조군과 비해 각 실험군 간에 유의한 차이는 관찰되지 않았다(Table 4-15). 그러나 암수 간의 몸무게에 대한 장기 무게를 비교해보면 뇌와 흉선의 상대적 무게가 수컷에 비해 암컷이 무거운 것으로 나타났다. 뇌 무게의 경우에 상대적으로 암컷의 체중이 적기 때문에 생기는 결과라고 생각할 수 있으며, 흉선과 같이 절대적으로 암컷의 장기가 무거운 것도 있기 때문에 암수 체중에 의한 것으로 생각할 수 있다. 다만 암수 간의 몸무게에 대한 상대적인 무게의 차이가 모두 정상적인 범위 내에 속



하였기 때문에 장기적인 시료 투여로 인한 결과는 아닌 것으로 판단된다.

#### 바. 혈액 생화학적 분석

혈액 생화학적 검사 결과에서 암컷의 경우에는 대조군에 비해 각 실험군의 측정값에 유의한 변화는 없는 것으로 나타났다(Table 4-16). 그리고 수컷의 경우에도 측정값이 대조군에 비해 각 실험군에서 유의적인 변화는 없었다. 그리고 ALP 측정값이 수컷에 비해 암컷의 평균값이 약간 높은 것으로 나타났다. 그러나 이러한 변화는 모두 정상범위 내의 변화였으며 시험물질 투여로 인한 결과는 아닌 것으로 생각된다.

#### 사. 혈액학적 분석

혈액학적 검사에서도 암컷과 수컷 모두에서 대조군에 비해 각 실험군의 측정값에 유의한 변화는 없는 것으로 나타났으며, 암컷과 수컷 사이에서도 유의한 변화는 없었다(Table 4-17). 그리고 각 측정 항목에서 모든 측정값은 정상 범위를 벗어나지 않았다.

#### 아. 비장세포의 증식반응

시료 투여에 따른 림프구의 증식반응 변화를 관찰하기 위하여 대조군과 실험군의 생쥐에서 분리한 비장세포를 이용하였다. 비장세포 중에서 B세포를 특이적으로 자극하는 LPS와, T세포를 특이적으로 자극하는 Con A로 증식반응을 유도한 다음 흡광도로 증식반응을 측정하였다. 대조군과 각 실험군 간의 증식반응 정도를 비교하기 위하여 LPS 또는 Con A를 첨가하였을 때 얻은 측정값을 무처리한 대조군의 측정값으로 나누어서 그 비율(stimulation index)을 비교하였다.

먼저 암컷의 경우에 LPS 자극에 대한 증식반응이 대조군  $3.345 \pm 0.302$ 인 것에 비해  $\text{GeO}_2$  또는  $\text{Ge}_{132}$ 를 투여한 실험군에서  $2.707 \pm 0.206$ ,  $2.668 \pm 0.498$ 로 약간 감소한 것으로 나타났지만 유의한 차이는 아니었다(Table 4-18, Fig. 4-10). 그리고 Con A 자극에 대한 증식반응도 대조군  $2.130 \pm 0.234$ 에 비해 각 실험군에서 유의한 차이는 관찰되지 않았다.

수컷의 경우에도 LPS 자극에 대한 증식반응이 대조군  $2.902 \pm 0.607$ 인 것에 비해 각 실험군에서 유의한 차이는 나타나지 않았고, Con A 자극에 대한 증식반응도 대조군에 비해 각 실험군에서 유의한 차이는 관찰되지 않았다(Table 4-19, Fig. 4-11). 그리고 암컷과 수컷 사이의 유의한 변화도 없는 것으로 판단된다.

#### 자. 림프구의 비율

시료 투여에 따른 림프구의 비율 변화를 관찰하기 위하여 대조군과 실험군의 생쥐에서 분리한 비장세포를 이용하였다. 비장세포 중에서 B세포는 특이적 세포막 단백질인 CD19에 대한 항체를 이용하였고, T세포 중에서 보조 T세포는 특이적 세포막 단백질인 CD4에 대한 항체를 이용하였고, 세포독성 T세포는 특이적 세포막 단백질인 CD8에 대한 항체를 이용하여 항체와

결합하는 세포수를 측정하였다.

먼저 암컷의 경우에 B세포는 비장세포 중에서 그 비율이 대조군과 실험군에서 약 40.7~46.0%로 유의한 차이는 관찰되지 않았다(Table 4-20, Fig. 4-12). 그리고 보조 T세포의 비율도 평균적으로 약 18.0~20.9%, 세포독성 T세포의 비율도 평균적으로 약 11.5~14.6%로 각 실험군 간의 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.

수컷의 경우에도 비장세포 중에서 B세포의 비율이 대조군과 실험군에서 평균적으로 약 41.2~48.3%로 유의한 차이는 관찰되지 않았다(Table 4-20, Fig. 4-12). 그리고 보조 T세포의 비율도 평균적으로 약 12.2~15.3%, 세포독성 T세포의 비율도 평균적으로 약 7.1~10.3%로 각 실험군 간의 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 앞에서 관찰한 LPS와 Con A 자극에 대한 B세포와 T세포의 증식반응에서 각 실험군 간의 유의한 차이가 나타나지 않은 결과와 일치한다고 생각된다. 즉 LPS와 Con A 자극에 반응하는 세포수에 차이가 없기 때문에 증식반응에도 유의한 차이가 없는 것으로 판단된다.

#### 차. 복수암 억제 효과

시료를 투여한 생쥐의 항암 효과를 관찰하기 위하여, 각 실험군당 10마리의 생쥐를 배치하고 매일  $500 \text{ mg kg}^{-1}$ 의 각 시료를 경구투여하였다. 시료를 투여한지 4주 후에 복수암세포인 sarcoma-180종양세포  $3 \times 10^6$ 개를 생리식염수  $300 \mu\text{L}$ 에 현탁하여 생쥐 복강에 투여하였다. 항종양 효과는 생존일수증양치(MST)와 연명율(ILS)로 나타내었다(Table 4-21, Fig. 4-13). 생존일수증양치는 대조군의 21.7보다  $\text{GeO}_2$ 를 함유한 상추 분말을 투여한 실험군에서 23.2로 가장 높은 수치가 나타났으며,  $\text{Ge}_{132}$ 를 함유한 상추 분말을 투여한 실험군에서는 22.1로 나타났다. 또한 연명율도 동일한 경향으로 나타났는데  $\text{GeO}_2$ 를 함유한 상추 분말을 투여한 실험군에서 6.91로 가장 높은 수치가 나타났으며,  $\text{Ge}_{132}$ 를 함유한 상추 분말을 투여한 실험군에서는 1.84로 나타났다. 즉 대조군은 종양세포에 의한 개체 사멸로 연명율 확인이 불가능하여  $\text{GeO}_2$ 와  $\text{Ge}_{132}$ 를 함유한 상추 분말을 투여한 실험군에서 종양활성을 유의하게 억제한다는 것을 확인하였다.

이상의 실험 결과로  $\text{GeO}_2$ 와  $\text{Ge}_{132}$ 를 함유한 상추 분말을 식약청 고시에 명시된 최고농도인  $2,000 \text{ mg kg}^{-1}$ 의 1/4 농도인  $500 \text{ mg kg}^{-1}$ 을 13주 동안 매일 경구 투여하였을 때, 시료와 관련된 특기할만한 독성증상이 관찰되지 않았으며, 시료 투여에 의한 항종양효과를 알 수 있었다.

Table 4–11. Changes in mean body weight(g) of female and male mice.

Groups	DW	Lettuce	Lettuce–GeO <sub>2</sub>	Lettuce–Ge <sub>132</sub>	
Female	0 day	16.880±0.639	18.022±0.742	17.803±0.579	17.720±1.010
	1week	16.355±0.448	17.090±0.601	16.898±0.349	16.322±1.161
	2week	17.512±0.582	18.748±0.914	18.603±0.241	18.097±0.770
	3week	18.053±0.579	19.273±0.970	19.132±0.373	19.065±0.720
	4week	18.548±0.692	19.182±0.954	19.552±0.406	19.415±0.803
	5week	18.655±0.907	19.300±1.058	19.547±0.400	19.662±0.681
	6week	20.077±0.873	20.413±0.846	19.442±2.166	20.283±0.394
	7week	20.182±0.866	20.772±0.955	20.798±1.101	20.923±0.427
	8week	20.587±0.774	21.082±1.150	21.055±0.714	20.520±0.410
	9week	20.797±0.721	20.762±1.027	21.383±1.020	20.988±0.421
	10week	21.155±1.006	21.113±1.105	21.250±1.030	21.605±0.399
	11week	21.532±0.806	21.672±0.945	21.688±0.925	21.852±0.575
	12week	21.942±0.520	21.883±1.222	22.118±1.037	22.365±0.651
13week	22.432±0.925	22.733±1.146	22.723±0.882	23.078±0.594	
Male	0 day	20.807±1.001	21.525±1.247	21.182±1.519	21.270±1.548
	1week	21.925±1.155	22.138±1.332	21.577±1.143	22.130±1.370
	2week	21.885±1.170	22.208±1.289	21.712±1.457	22.603±1.577
	3week	22.843±1.030	23.006±1.232	22.717±1.447	23.147±1.796
	4week	23.058±1.168	23.387±1.165	23.545±1.310	23.502±1.412
	5week	23.362±1.146	23.945±1.151	23.598±1.517	23.810±1.612
	6week	23.643±1.078	24.217±1.330	23.587±1.265	23.830±1.582
	7week	24.173±1.099	24.707±1.147	24.270±1.282	24.540±1.448
	8week	24.618±0.885	24.760±0.907	24.315±1.705	24.510±1.845
	9week	24.768±0.871	24.740±1.002	24.607±1.611	24.510±1.726
	10week	25.113±1.076	25.098±0.950	25.278±1.917	24.362±1.897
	11week	25.403±0.812	25.213±0.728	25.562±1.990	24.892±2.195
	12week	25.620±1.047	25.617±0.739	25.838±1.790	24.685±1.811
13week	26.405±1.511	26.330±0.970	26.098±1.577	25.292±1.963	

Changes in mean body weights of female and male mice during daily administration with 500 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce, lettuce–GeO<sub>2</sub>, or lettuce–Ge<sub>132</sub> powder, or its vehicle for 13 weeks.

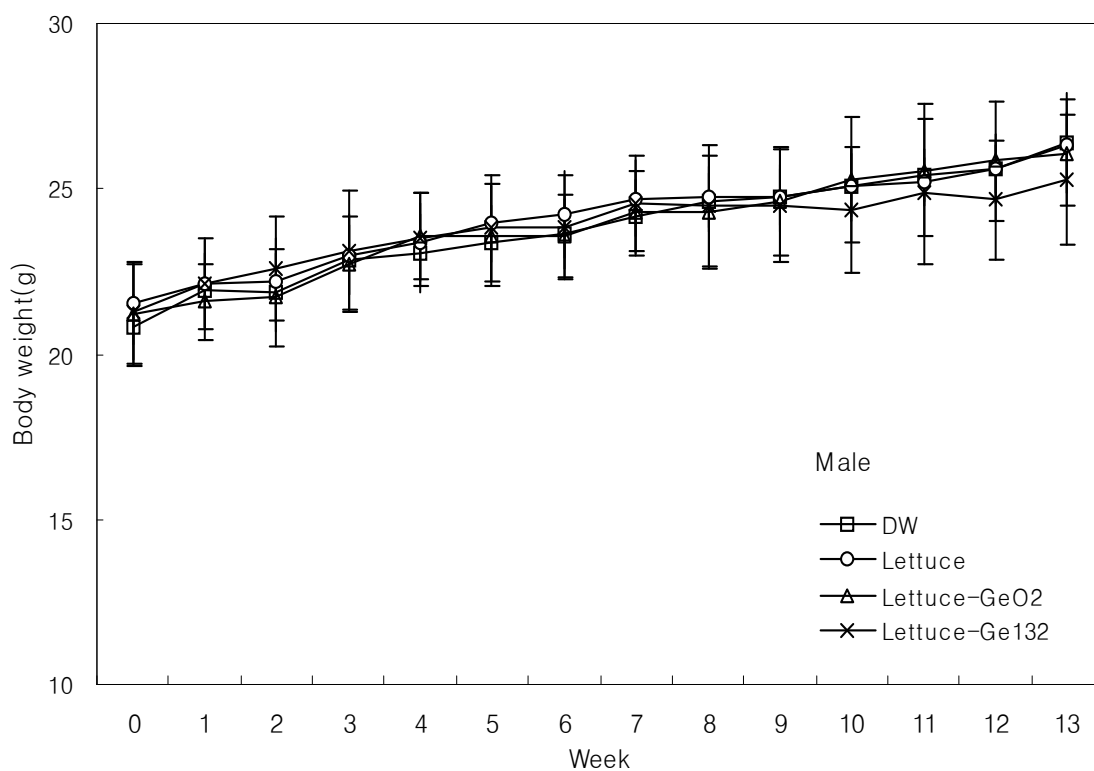
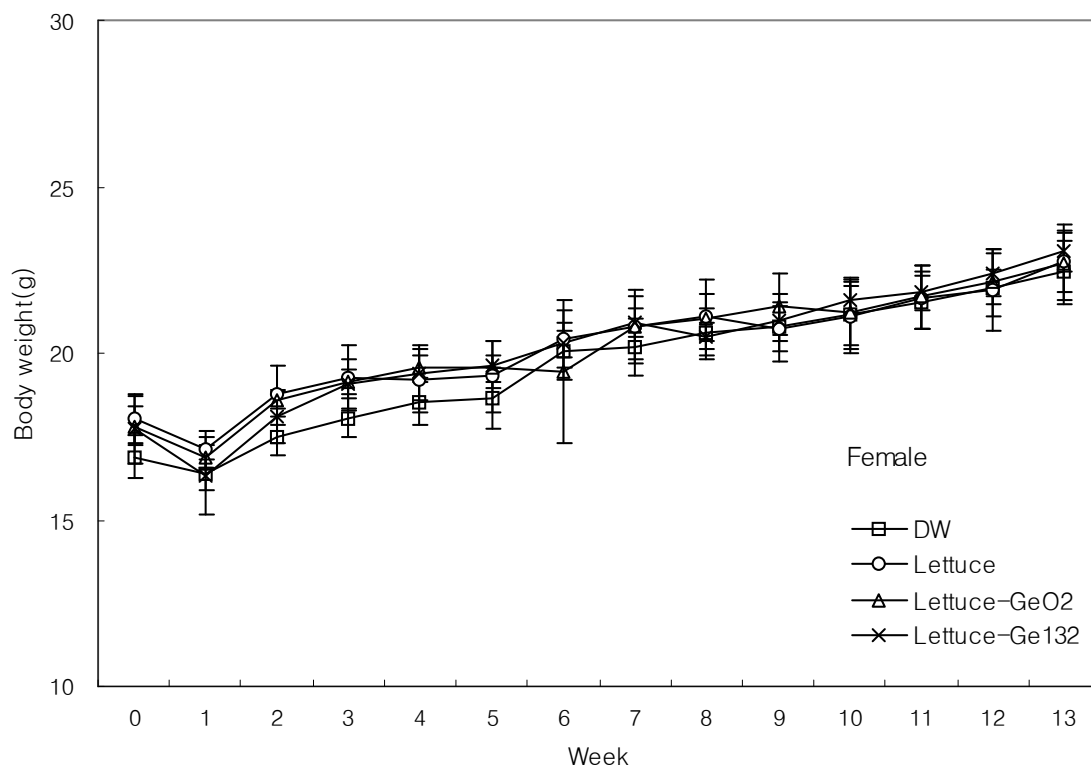


Fig. 4-7. Changes in mean body weights of female and male mice during daily administration with 500 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce(○), lettuce-GeO<sub>2</sub>(△), or lettuce-Ge<sub>132</sub>(×) powder, or its vehicle(□) for 13 weeks.

Table 4–12. Feed consumption by female and male mice(g)

Groups	DW	Lettuce	Lettuce–GeO <sub>2</sub>	Lettuce–Ge132	
F a m a l e	1week	21.420	20.082	19.577	18.748
	2week	20.385	21.125	20.515	21.483
	3week	20.360	19.135	18.398	19.227
	4week	20.545	18.648	19.857	21.572
	5week	20.612	18.932	19.645	20.992
	6week	20.600	19.490	19.454	19.567
	7week	21.247	21.255	20.890	21.372
	8week	22.885	20.793	21.605	21.575
	9week	20.828	19.407	20.243	19.140
	10week	20.052	18.773	19.640	19.817
	11week	19.263	19.673	20.320	19.733
	12week	20.615	18.868	19.368	19.573
	13week	19.622	19.668	19.678	19.328
M a l e	1week	23.563	22.012	22.913	23.012
	2week	23.132	20.975	21.142	22.590
	3week	22.415	23.147	21.625	22.130
	4week	22.295	22.818	23.283	23.073
	5week	22.548	23.233	22.425	22.530
	6week	22.385	22.590	22.323	21.090
	7week	24.025	23.853	25.205	24.110
	8week	23.132	23.222	24.263	22.052
	9week	23.120	23.527	23.233	21.880
	10week	22.742	22.058	22.805	22.964
	11week	22.578	21.257	22.452	22.022
	12week	22.220	22.525	23.375	19.342
	13week	22.432	23.062	21.650	21.314

Feed consumption by female and male mice during daily administration with 500 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce, Lettuce–GeO<sub>2</sub>, or Lettuce–Ge132 powder, or its vehicle for 13 weeks.

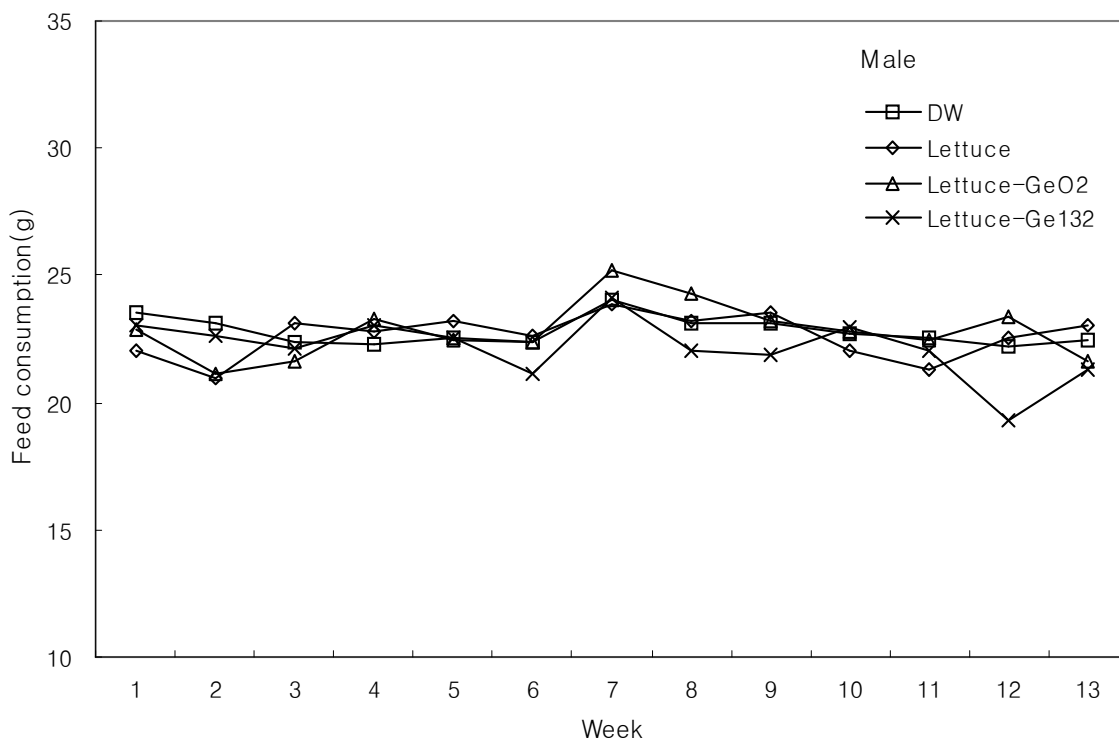
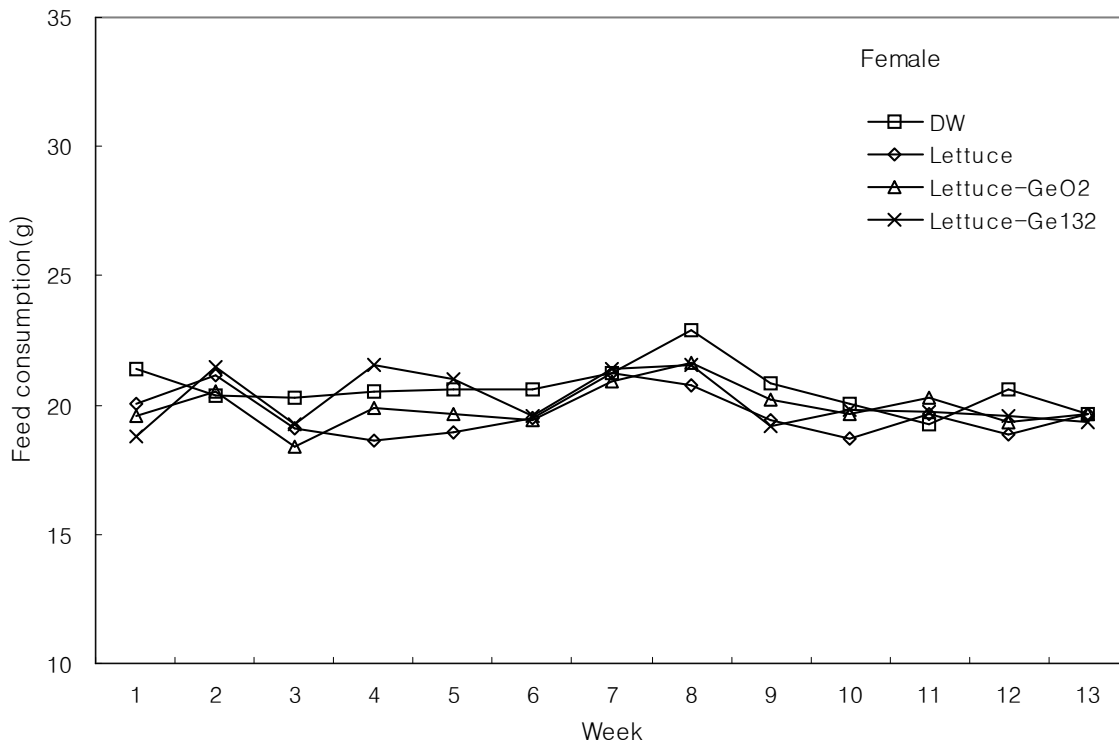


Fig. 4–8. Feed consumption by female and male mice during daily administration with 500 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce(○), lettuce-GeO<sub>2</sub>(△), or lettuce-Ge<sub>132</sub>(×) powder, or its vehicle(□) for 13 weeks.

Table 4–13. Water consumption(ml) by female and male mice.

Groups	DW	Lettuce	Lettuce–GeO <sub>2</sub>	Lettuce–Ge <sub>132</sub>	
F e m a l e	1week	26.167	23.833	23.667	22.833
	2week	26.667	26.833	25.333	26.667
	3week	24.000	24.000	22.500	24.333
	4week	26.167	24.333	24.833	27.667
	5week	25.500	23.833	25.167	26.667
	6week	25.333	24.833	26.000	24.500
	7week	27.333	26.333	27.500	27.167
	8week	28.500	25.333	25.000	26.000
	9week	26.667	24.500	25.000	23.667
	10week	24.667	24.167	22.500	24.167
	11week	26.667	25.833	26.500	25.500
	12week	25.333	24.333	26.000	22.500
	13week	24.167	24.667	24.000	23.333
M a l e	1week	27.500	28.667	26.000	28.667
	2week	29.167	31.500	28.000	30.000
	3week	27.667	32.167	28.333	28.667
	4week	28.167	33.000	31.333	30.167
	5week	28.500	34.500	30.333	30.500
	6week	28.167	31.667	30.667	28.167
	7week	28.000	31.667	33.000	29.833
	8week	28.000	30.667	31.333	28.167
	9week	26.333	29.333	30.000	26.667
	10week	26.167	27.000	30.000	25.800
	11week	29.167	32.000	31.500	28.600
	12week	26.667	31.333	32.167	26.600
	13week	26.000	30.667	29.167	26.400

Water consumption by female and male mice during daily administration with 500 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce, lettuce–GeO<sub>2</sub>, or lettuce–Ge<sub>132</sub> powder, or its vehicle for 13 weeks.

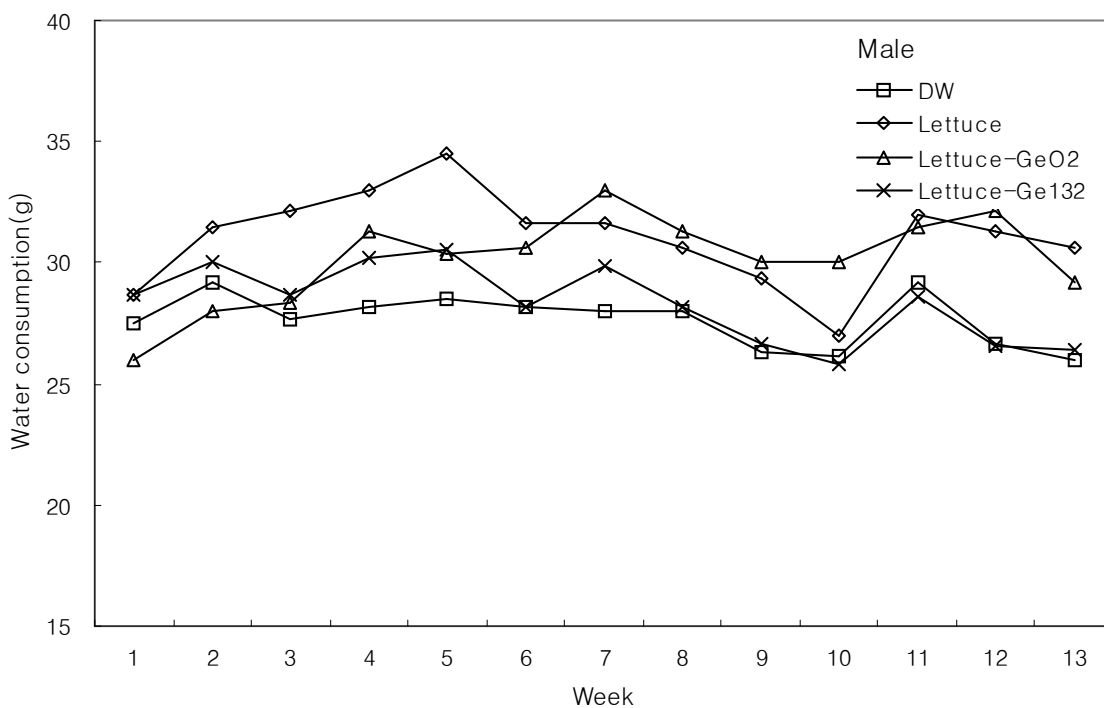
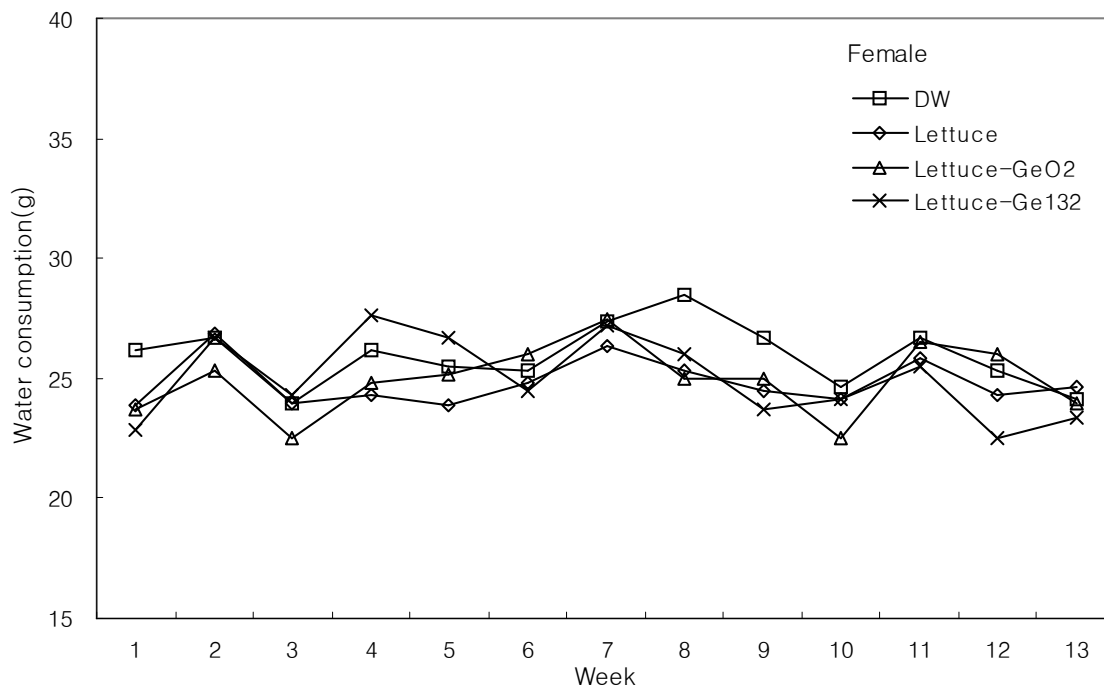


Fig. 4-9. Water consumption by female and male mice during daily administration with 500 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce(○), lettuce-GeO<sub>2</sub>(△), or lettuce-Ge<sub>132</sub>(×) powder, or its vehicle(□) for 13 weeks.



Table 4-14. Absolute organ weights of mice(n=6) orally administered with Organic-germanium lettuce powder or its vehicle.

Sex		Male				Female			
Groups	DW	Lettuce	Lettuce-GeO <sub>2</sub>	Lettuce-Ge <sub>132</sub>	DW	Lettuce	Lettuce-GeO <sub>2</sub>	Lettuce-Ge <sub>132</sub>	
Brain(g)	0.4256±0.0382	0.4235±0.0074	0.4444±0.0108	0.4268±0.0070	0.4349±0.0098	0.4403±0.0039	0.4461±0.0014	0.4445±0.0068	
Thymus(g)	0.0359±0.0088	0.0344±0.0044	0.0345±0.0047	0.0398±0.0023	0.0448±0.0056	0.0413±0.0111	0.0519±0.0056	0.0412±0.0043	
Heart(g)	0.1296±0.0392	0.1105±0.0114	0.1131±0.0102	0.1051±0.0082	0.0910±0.0078	0.0861±0.0075	0.0939±0.0026	0.0846±0.0063	
Lung(g)	0.1547±0.0816	0.1148±0.0059	0.1402±0.0259	0.1238±0.0191	0.1120±0.0114	0.1028±0.0096	0.1167±0.0122	0.1075±0.0072	
Liver(g)	0.8817±0.0472	0.9339±0.0699	0.8845±0.0784	0.8961±0.0601	0.7604±0.0912	0.8295±0.0973	0.7784±0.0326	0.8342±0.0752	
Spleen(g)	0.0609±0.0135	0.0625±0.0107	0.0575±0.0075	0.0546±0.0056	0.0516±0.0043	0.0534±0.0082	0.0575±0.0034	0.0531±0.0038	
Kidneys(g)	left	0.1269±0.0132	0.1297±0.0087	0.1243±0.0113	0.1330±0.0133	0.0999±0.0109	0.0941±0.0091	0.1053±0.0082	0.0961±0.0051
	right	0.1338±0.0218	0.1423±0.0262	0.1366±0.0069	0.1303±0.0109	0.1050±0.0120	0.0981±0.0129	0.1052±0.0067	0.1045±0.0089
Adrenals(g)	left	0.0011±0.0001	0.0024±0.0005	0.0012±0.0004	0.0025±0.0003	0.0034±0.0004	0.0021±0.0004	0.0022±0.0007	0.0019±0.0009
	right	0.0014±0.0008	0.0020±0.0011	0.0013±0.0002	0.0013±0.0007	0.0023±0.0006	0.0020±0.0003	0.0026±0.0007	0.0017±0.0007
Testes(g)	left	0.0710±0.0026	0.0628±0.0065	0.0723±0.0047	0.0736±0.0110	-	-	-	-
	right	0.0713±0.0059	0.0648±0.0065	0.0725±0.0047	0.0747±0.0102	-	-	-	-
Epididymides(g)	left	0.0267±0.0029	0.0213±0.0028	0.0274±0.0023	0.0268±0.0052	-	-	-	-
	right	0.0231±0.0030	0.0225±0.0015	0.0262±0.0022	0.0281±0.0033	-	-	-	-
Prostate(g)	0.0160±0.0051	0.0174±0.0052	0.0205±0.0047	0.0158±0.0025	-	-	-	-	
Ovaries(g)	left	-	-	-	-	0.0018±0.0009	0.0018±0.0006	0.0015±0.0004	0.0016±0.0007
	right	-	-	-	-	0.0016±0.0007	0.0017±0.0004	0.0014±0.0005	0.0019±0.0004
Uterus(g)	-	-	-	-	0.0528±0.0170	0.0414±0.0158	0.0408±0.0195	0.0394±0.0093	

Values are presented as means ± S.D. for 6 mice

Table 4-15. Relative organ weights of mice(n=6) orally administered with Organic-germanium lettuce powder or its vehicle.

Values are presented as means  $\pm$  S.D. for 6 mice

Sex		Male				Female			
Groups	DW	Lettuce	Lettuce-GeO <sub>2</sub>	Lettuce-Ge <sub>132</sub>	DW	Lettuce	Lettuce-GeO <sub>2</sub>	Lettuce-Ge <sub>132</sub>	
Brain(g)	1.7742 $\pm$ 0.1132	1.8305 $\pm$ 0.0846	1.8650 $\pm$ 0.0926	1.8440 $\pm$ 0.1826	2.1456 $\pm$ 0.1373	2.1322 $\pm$ 0.1097	2.1153 $\pm$ 0.1118	2.1520 $\pm$ 0.0841	
Thymus(g)	0.1548 $\pm$ 0.0048	0.1475 $\pm$ 0.0233	0.1486 $\pm$ 0.0205	0.1727 $\pm$ 0.0178	0.2240 $\pm$ 0.0313	0.1993 $\pm$ 0.0514	0.2459 $\pm$ 0.0258	0.1996 $\pm$ 0.0217	
Heart(g)	0.5606 $\pm$ 0.2103	0.4615 $\pm$ 0.0451	0.4785 $\pm$ 0.0355	0.4651 $\pm$ 0.0407	0.4487 $\pm$ 0.0440	0.4161 $\pm$ 0.0290	0.4446 $\pm$ 0.0262	0.4101 $\pm$ 0.0385	
Lung(g)	0.5152 $\pm$ 0.1215	0.4940 $\pm$ 0.0369	0.6036 $\pm$ 0.0726	0.5509 $\pm$ 0.1001	0.5535 $\pm$ 0.0743	0.4966 $\pm$ 0.0394	0.5516 $\pm$ 0.0394	0.5212 $\pm$ 0.0493	
Liver(g)	3.6703 $\pm$ 0.1564	4.0514 $\pm$ 0.4000	3.7289 $\pm$ 0.1293	3.9854 $\pm$ 0.4796	3.7373 $\pm$ 0.3610	4.0132 $\pm$ 0.5000	3.6884 $\pm$ 0.1813	4.0360 $\pm$ 0.3522	
Spleen(g)	0.2626 $\pm$ 0.0750	0.2552 $\pm$ 0.2350	0.2445 $\pm$ 0.0311	0.2416 $\pm$ 0.0462	0.2545 $\pm$ 0.0269	0.2574 $\pm$ 0.0356	0.2826 $\pm$ 0.0210	0.2575 $\pm$ 0.0263	
Kidneys(g)	left	0.5352 $\pm$ 0.0395	0.5599 $\pm$ 0.0608	0.5255 $\pm$ 0.0579	0.5964 $\pm$ 0.0339	0.4931 $\pm$ 0.0630	0.4548 $\pm$ 0.0458	0.4990 $\pm$ 0.0388	0.4651 $\pm$ 0.0231
	right	0.5310 $\pm$ 0.0364	0.5735 $\pm$ 0.0797	0.5732 $\pm$ 0.0473	0.5830 $\pm$ 0.0761	0.5172 $\pm$ 0.0594	0.4741 $\pm$ 0.0569	0.4980 $\pm$ 0.0236	0.5064 $\pm$ 0.0532
Adrenals(g)	left	0.0047 $\pm$ 0.0006	0.0102 $\pm$ 0.0029	0.0051 $\pm$ 0.0013	0.0103 $\pm$ 0.0021	0.0166 $\pm$ 0.0025	0.0100 $\pm$ 0.0014	0.0104 $\pm$ 0.0035	0.0090 $\pm$ 0.0045
	right	0.0060 $\pm$ 0.0036	0.0084 $\pm$ 0.0051	0.0053 $\pm$ 0.0011	0.0062 $\pm$ 0.0030	0.0112 $\pm$ 0.0033	0.0095 $\pm$ 0.0015	0.0123 $\pm$ 0.0030	0.0084 $\pm$ 0.0017
Testes(g)	left	0.2988 $\pm$ 0.0241	0.2786 $\pm$ 0.0260	0.3061 $\pm$ 0.0127	0.3308 $\pm$ 0.0556	-	-	-	-
	right	0.2919 $\pm$ 0.0203	0.2893 $\pm$ 0.0245	0.3047 $\pm$ 0.0218	0.3324 $\pm$ 0.0617	-	-	-	-
Epididymides(g)	left	0.1116 $\pm$ 0.0104	0.0940 $\pm$ 0.0134	0.1160 $\pm$ 0.0120	0.1216 $\pm$ 0.0258	-	-	-	-
	right	0.0962 $\pm$ 0.0115	0.0955 $\pm$ 0.0048	0.1094 $\pm$ 0.0127	0.1213 $\pm$ 0.0210	-	-	-	-
Prostate(g)	0.0709 $\pm$ 0.0192	0.0795 $\pm$ 0.0255	0.0844 $\pm$ 0.0176	0.0701 $\pm$ 0.0185	-	-	-	-	
Ovaries(g)	left	-	-	-	-	0.0088 $\pm$ 0.0049	0.0084 $\pm$ 0.0025	0.0069 $\pm$ 0.0017	0.0077 $\pm$ 0.0032
	right	-	-	-	-	0.0078 $\pm$ 0.0033	0.0080 $\pm$ 0.0019	0.0064 $\pm$ 0.0026	0.0092 $\pm$ 0.0022
Uterus(g)	-	-	-	-	0.2612 $\pm$ 0.0878	0.1988 $\pm$ 0.0741	0.1907 $\pm$ 0.0845	0.1908 $\pm$ 0.0453	

Table 4-16. Blood biochemistry of mice(n=6) orally administered with Organic-germanium lettuce powder or its vehicle.

Values are presented as means  $\pm$  S.D. for 6 mice

Sex	Male				Female			
	DW	Lettuce	Lettuce-GeO <sub>2</sub>	Lettuce-Ge <sub>132</sub>	DW	Lettuce(5마리)	Lettuce-GeO <sub>2</sub>	Lettuce-Ge <sub>132</sub>
GPT(U L)	47.83 $\pm$ 20.53	41.40 $\pm$ 5.68	35.50 $\pm$ 2.88	40.40 $\pm$ 4.28	42.33 $\pm$ 18.38	65.50 $\pm$ 28.69	35.85 $\pm$ 29.03	72.17 $\pm$ 56.81
GOT(U L)	103.00 $\pm$ 66.37	73.20 $\pm$ 41.98	98.67 $\pm$ 25.29	84.60 $\pm$ 30.26	165.00 $\pm$ 77.11	307.33 $\pm$ 72.90	118.00 $\pm$ 66.81	136.60 $\pm$ 60.59
ALP(U L)	259.67 $\pm$ 11.20	265.40 $\pm$ 36.46	231.50 $\pm$ 19.71	242.80 $\pm$ 19.49	312.17 $\pm$ 38.70	301.00 $\pm$ 34.87	335.75 $\pm$ 13.87	321.83 $\pm$ 37.44
CKMB(U L)	>300	132.25 $\pm$ 40.97	>300	>300	>300	>300	>300	>300
GLU(mg dL)	159.67 $\pm$ 31.71	165.20 $\pm$ 41.37	136.00 $\pm$ 39.43	161.60 $\pm$ 30.06	170.50 $\pm$ 64.94	187.17 $\pm$ 51.21	160.75 $\pm$ 54.56	188.17 $\pm$ 38.63
BUN(mg dL)	30.77 $\pm$ 5.07	35.60 $\pm$ 4.29	27.88 $\pm$ 5.35	31.84 $\pm$ 2.27	29.45 $\pm$ 3.91	27.87 $\pm$ 3.11	29.08 $\pm$ 3.41	30.00 $\pm$ 3.21
CRE(mg dL)	0.12 $\pm$ 0.04	0.12 $\pm$ 0.05	0.12 $\pm$ 0.04	0.18 $\pm$ 0.08	0.13 $\pm$ 0.05	0.10 $\pm$ 0.00	0.13 $\pm$ 0.05	0.13 $\pm$ 0.05
TBIL(mg dL)	0.42 $\pm$ 0.04	0.50 $\pm$ 0.07	0.47 $\pm$ 0.08	0.56 $\pm$ 0.13	0.60 $\pm$ 0.09	0.60 $\pm$ 0.14	0.65 $\pm$ 0.17	0.62 $\pm$ 0.23
TCHO(mg dL)	93.33 $\pm$ 6.74	104.60 $\pm$ 11.37	93.33 $\pm$ 5.54	95.2 $\pm$ 11.78	83.50 $\pm$ 18.56	88.50 $\pm$ 8.17	88.00 $\pm$ 12.57	92.00 $\pm$ 9.57
TG(mg dL)	88.50 $\pm$ 13.20	88.00 $\pm$ 12.21	83.33 $\pm$ 15.76	83.00 $\pm$ 17.38	113.83 $\pm$ 26.32	107.00 $\pm$ 30.13	90.50 $\pm$ 11.21	102.67 $\pm$ 19.42
TP(g dL)	5.12 $\pm$ 0.17	5.26 $\pm$ 0.17	5.03 $\pm$ 0.16	5.06 $\pm$ 0.29	5.32 $\pm$ 0.33	5.20 $\pm$ 0.35	5.40 $\pm$ 0.32	5.12 $\pm$ 0.12
ALB(g dL)	2.48 $\pm$ 0.08	2.50 $\pm$ 0.10	2.43 $\pm$ 0.08	2.48 $\pm$ 0.15	2.75 $\pm$ 0.19	2.65 $\pm$ 0.27	2.83 $\pm$ 0.17	2.70 $\pm$ 0.09
GGT(U L)	2.33 $\pm$ 0.82	2.20 $\pm$ 0.84	2.00 $\pm$ 0.63	1.80 $\pm$ 0.84	1.00 $\pm$ 0.00	1.00 $\pm$ 0.00	1.00 $\pm$ 0.00	1.67 $\pm$ 0.82
LDH(U L)	256.17 $\pm$ 155.01	245.80 $\pm$ 119.61	276.17 $\pm$ 48.31	362.60 $\pm$ 184.40	395.67 $\pm$ 163.23	560.67 $\pm$ 185.43	407.75 $\pm$ 251.03	316.40 $\pm$ 117.60
IP(mg dL)	8.27 $\pm$ 1.27	7.22 $\pm$ 1.47	6.68 $\pm$ 1.22	7.82 $\pm$ 1.64	8.25 $\pm$ 2.63	6.98 $\pm$ 1.06	6.50 $\pm$ 2.49	6.87 $\pm$ 1.79
Ca(mg dL)	9.72 $\pm$ 0.23	9.72 $\pm$ 0.27	9.67 $\pm$ 0.26	9.88 $\pm$ 0.37	9.98 $\pm$ 0.87	9.45 $\pm$ 0.57	9.53 $\pm$ 0.64	9.37 $\pm$ 0.51
Na(mEq L)	149.50 $\pm$ 1.378	149.40 $\pm$ 0.89	146.17 $\pm$ 1.47	146.80 $\pm$ 1.79	144.50 $\pm$ 6.29	146.33 $\pm$ 1.63	145.50 $\pm$ 1.29	145.17 $\pm$ 2.14
K(mEq L)	4.33 $\pm$ 0.27	4.02 $\pm$ 0.30	2.75 $\pm$ 0.34	4.78 $\pm$ 0.71	4.67 $\pm$ 0.54	4.77 $\pm$ 0.56	4.75 $\pm$ 0.31	4.83 $\pm$ 0.73
Cl(mEq L)	113.83 $\pm$ 1.17	113.20 $\pm$ 1.64	110.50 $\pm$ 1.05	110.20 $\pm$ 1.1	109.33 $\pm$ 7.17	111.50 $\pm$ 1.52	109.00 $\pm$ 1.41	108.50 $\pm$ 1.87

Table 4-17. Hematology of mice(n=6) orally administered with Organic-germanium lettuce powder or its vehicle.

Sex	Male				Female				
	Groups	DW	Lettuce	Lettuce-GeO <sub>2</sub>	Lettuce-Ge <sub>132</sub>	DW	Lettuce	Lettuce-GeO <sub>2</sub>	Lettuce-Ge <sub>132</sub>
	RBC(M $\mu$ L)	10.175 $\pm$ 0.313	9.457 $\pm$ 1.497	10.033 $\pm$ 0.248	9.512 $\pm$ 2.019	10.350 $\pm$ 0.204	9.822 $\pm$ 0.368	10.180 $\pm$ 0.358	9.708 $\pm$ 0.423
	Hb(g dL)	14.133 $\pm$ 0.484	12.867 $\pm$ 2.120	13.425 $\pm$ 0.639	12.683 $\pm$ 2.824	14.700 $\pm$ 0.245	13.733 $\pm$ 0.372	14.720 $\pm$ 0.268	13.533 $\pm$ 0.745
	HCT(%)	40.300 $\pm$ 2.404	36.333 $\pm$ 5.882	38.600 $\pm$ 1.058	36.483 $\pm$ 7.943	41.883 $\pm$ 0.608	38.35 $\pm$ 2.331	41.140 $\pm$ 1.133	38.983 $\pm$ 1.842
	MCV(fL)	39.583 $\pm$ 1.192	38.417 $\pm$ 0.773	38.463 $\pm$ 0.277	38.317 $\pm$ 0.479	40.467 $\pm$ 0.532	39.583 $\pm$ 0.877	40.440 $\pm$ 0.498	40.150 $\pm$ 0.606
RBC indices	MCH(pg)	13.900 $\pm$ 0.514	13.583 $\pm$ 0.407	13.350 $\pm$ 0.366	13.283 $\pm$ 0.331	14.217 $\pm$ 0.376	13.983 $\pm$ 0.397	14.460 $\pm$ 0.288	13.933 $\pm$ 0.463
	MCHC(g dL)	35.150 $\pm$ 1.828	35.400 $\pm$ 0.477	34.763 $\pm$ 0.758	34.733 $\pm$ 0.737	35.100 $\pm$ 0.800	35.383 $\pm$ 0.646	35.800 $\pm$ 0.700	34.717 $\pm$ 0.900
	PLT(K $\mu$ L)	1128.7 $\pm$ 47.3	1147.5 $\pm$ 208.1	1204.0 $\pm$ 182.9	1146.0 $\pm$ 160.8	1021.7 $\pm$ 60.2	1200.7 $\pm$ 40.2	1184.2 $\pm$ 81.9	1183.2 $\pm$ 102.9
	WBC(K $\mu$ L)	6.797 $\pm$ 4.280	4.683 $\pm$ 1.544	6.157 $\pm$ 1.744	5.667 $\pm$ 1.804	4.277 $\pm$ 1.677	4.133 $\pm$ 1.740	5.588 $\pm$ 0.541	4.910 $\pm$ 1.463
	NE(%)	10.502 $\pm$ 2.987	11.162 $\pm$ 3.678	8.238 $\pm$ 1.027	8.083 $\pm$ 1.564	9.008 $\pm$ 2.649	12.445 $\pm$ 4.890	10.174 $\pm$ 2.333	10.855 $\pm$ 0.934
	LY(%)	86.952 $\pm$ 3.264	86.252 $\pm$ 5.935	89.246 $\pm$ 1.547	89.338 $\pm$ 1.376	88.09 $\pm$ 2.334	83.748 $\pm$ 5.679	87.148 $\pm$ 3.014	86.597 $\pm$ 1.407
WBC differential ciunt(%)	MO(%)	1.785 $\pm$ 0.727	1.850 $\pm$ 1.146	2.171 $\pm$ 0.760	2.308 $\pm$ 0.823	2.240 $\pm$ 0.425	2.823 $\pm$ 1.292	2.400 $\pm$ 0.829	2.210 $\pm$ 0.612
	EO(%)	0.337 $\pm$ 0.224	0.603 $\pm$ 1.188	0.246 $\pm$ 0.157	0.210 $\pm$ 0.133	0.325 $\pm$ 0.215	0.802 $\pm$ 0.656	0.256 $\pm$ 0.108	0.253 $\pm$ 0.161
	BA(%)	0.083 $\pm$ 0.068	0.205 $\pm$ 0.395	0.098 $\pm$ 0.079	0.058 $\pm$ 0.072	0.045 $\pm$ 0.055	0.108 $\pm$ 0.118	0.026 $\pm$ 0.015	0.085 $\pm$ 0.101

Values are presented as means  $\pm$  S.D. for 6 mice

Table 4-18. The effect of LPS and Con A on the proliferation of female mice spleen cells

Groups	(-)	LPS (10 $\mu\text{g mL}^{-1}$ )	Con A (1 $\mu\text{g mL}^{-1}$ )	
DW	Mouse1	1	3.450	2.122
	Mouse2	1	3.344	1.744
	Mouse3	1	3.200	2.306
	Mouse4	1	3.021	2.373
	Mouse5	1	3.171	2.247
	Mouse6	1	3.882	1.987
	Means $\pm$ S.D	1.000 $\pm$ 0.000	3.345 $\pm$ 0.302	2.130 $\pm$ 0.234
Lettuce	Mouse1	1	4.371	1.946
	Mouse2	1	2.727	1.946
	Mouse3	1	3.256	1.912
	Mouse4	1	3.427	2.101
	Mouse5	1	3.453	2.257
	Mouse6	1	3.284	2.110
	Means $\pm$ S.D	1.000 $\pm$ 0.000	3.421 $\pm$ 0.535	2.046 $\pm$ 0.134
Lettuce-GeO <sub>2</sub>	Mouse1	1	2.733	1.868
	Mouse2			
	Mouse3	1	2.934	1.973
	Mouse4			
	Mouse5	1	2.727	1.796
	Mouse6	1	2.434	1.806
	Means $\pm$ S.D	1.000 $\pm$ 0.000	2.707 $\pm$ 0.206	1.861 $\pm$ 0.081
Lettuce-Ge <sub>132</sub>	Mouse1	1	3.251	1.855
	Mouse2	1	2.989	1.883
	Mouse3	1	2.841	2.120
	Mouse4	1	2.809	2.356
	Mouse5	1	2.015	1.818
	Mouse6	1	2.103	1.842
	Means $\pm$ S.D	1.000 $\pm$ 0.000	2.668 $\pm$ 0.498	1.979 $\pm$ 0.215

The spleen cells( $5 \times 10^5$  cells well) of female mice during daily administration with 500 mg  $\text{kg}^{-1}$  of lettuce , lettuce, lettuce-GeO<sub>2</sub>, or lettuce-Ge<sub>132</sub> or its vehicle for 13 weeks were stimulated LPS( $10 \mu\text{g mL}^{-1}$ ) or Con A( $1 \mu\text{g mL}^{-1}$ ) for 48 hours.

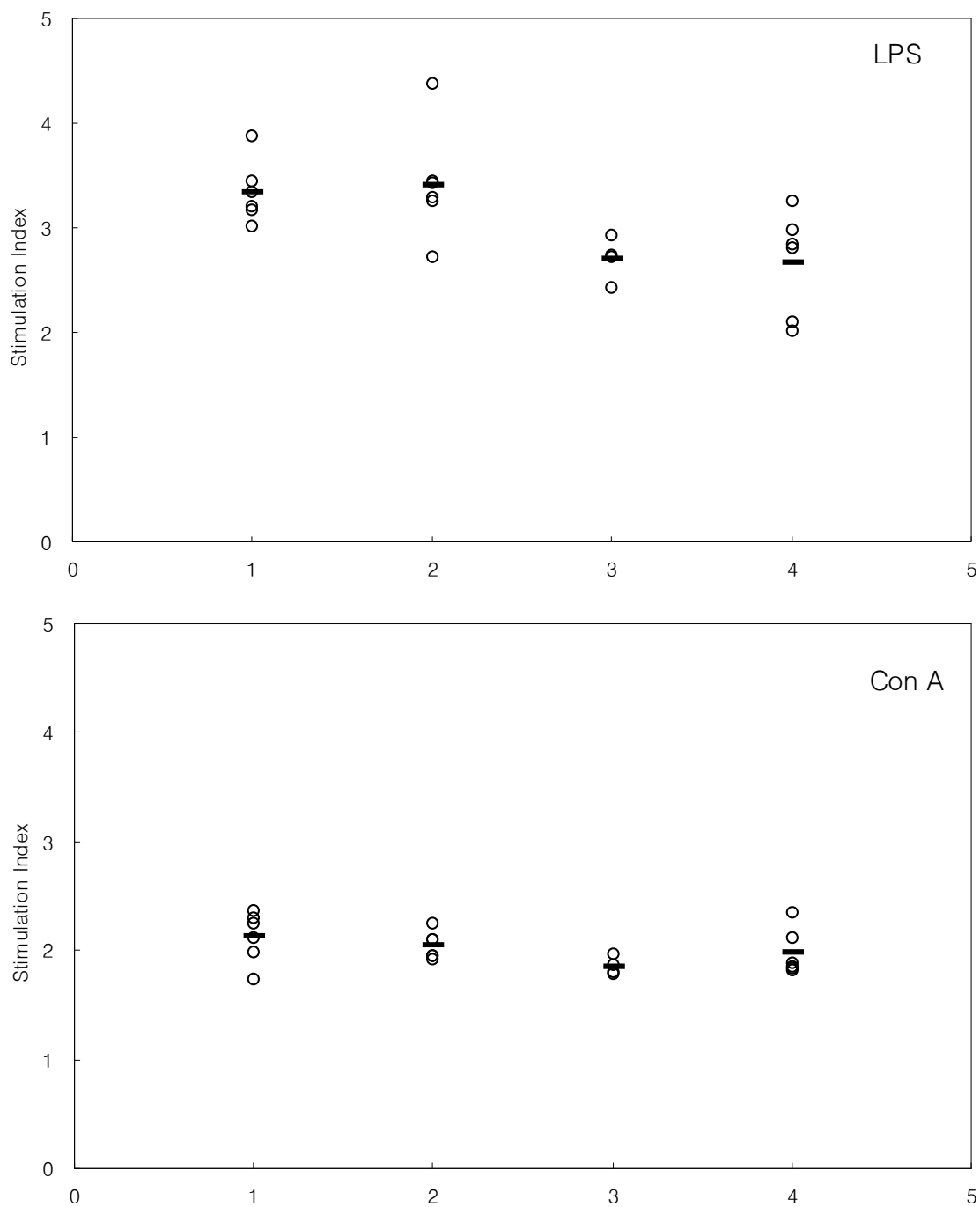


Fig. 4-10. The effect of LPS and Con A on the proliferation of female mice spleen cells. The spleen cells( $5 \times 10^5$  cells well) of female mice during daily administration with  $500 \text{ mg kg}^{-1}$  of lettuce , lettuce(2), lettuce- $\text{GeO}_2$ (3), or lettuce- $\text{Ge}_{132}$ (4) or its vehicle(1) for 13 weeks were stimulated LPS( $10 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$ ) or Con A( $1 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$ ) for 48 hours.

Table 4-19. The effect of LPS and Con A on the proliferation of male mice spleen cells.

Groups	(-)	LPS(10 $\mu\text{g mL}^{-1}$ )	Con A(1 $\mu\text{g mL}^{-1}$ )	
DW	Mouse1	1	2.278	2.399
	Mouse2	1	2.858	2.290
	Mouse3	1	2.707	2.436
	Mouse4	1	2.728	2.544
	Mouse5	1	4.071	3.495
	Mouse6	1	2.768	2.485
	Means $\pm$ S.D	1.000 $\pm$ 0.000	2.902 $\pm$ 0.607	2.608 $\pm$ 0.443
Lettuce	Mouse1	1	2.427	2.194
	Mouse2	1	2.237	2.278
	Mouse3	1	2.863	2.646
	Mouse4	1	2.615	2.501
	Mouse5	1	3.347	2.585
	Mouse6	1	2.648	2.389
	Means $\pm$ S.D	1.000 $\pm$ 0.000	2.689 $\pm$ 0.385	2.432 $\pm$ 0.177
Lettuce- GeO <sub>2</sub>	Mouse1	1	2.873	2.316
	Mouse2	1	2.898	2.419
	Mouse3	1	2.187	1.896
	Mouse4	1	2.329	2.285
	Mouse5	1	2.596	2.203
	Mouse6	1	2.715	2.463
	Means $\pm$ S.D	1.000 $\pm$ 0.000	2.600 $\pm$ 0.209	2.263 $\pm$ 0.203
Lettuce- Ge <sub>132</sub>	Mouse1	1	2.417	2.324
	Mouse2			
	Mouse3	1	3.261	2.540
	Mouse4	1	2.767	2.472
	Mouse5	1	2.210	2.122
	Mouse6	1	1.716	2.233
	Means $\pm$ S.D	1.000 $\pm$ 0.000	2.474 $\pm$ 0.582	2.338 $\pm$ 0.171

The spleen cells( $5 \times 10^5$  cells/well<sup>-1</sup>) of male mice during daily administration with 2,000 mg kg<sup>-1</sup> lettuce(2), lettuce-GeO<sub>2</sub>(3), lettuce-Ge<sub>132</sub>(4) or its vehicle(1) for 13 weeks were stimulated LPS(10  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ) or Con A(1  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ) for 48 hours.

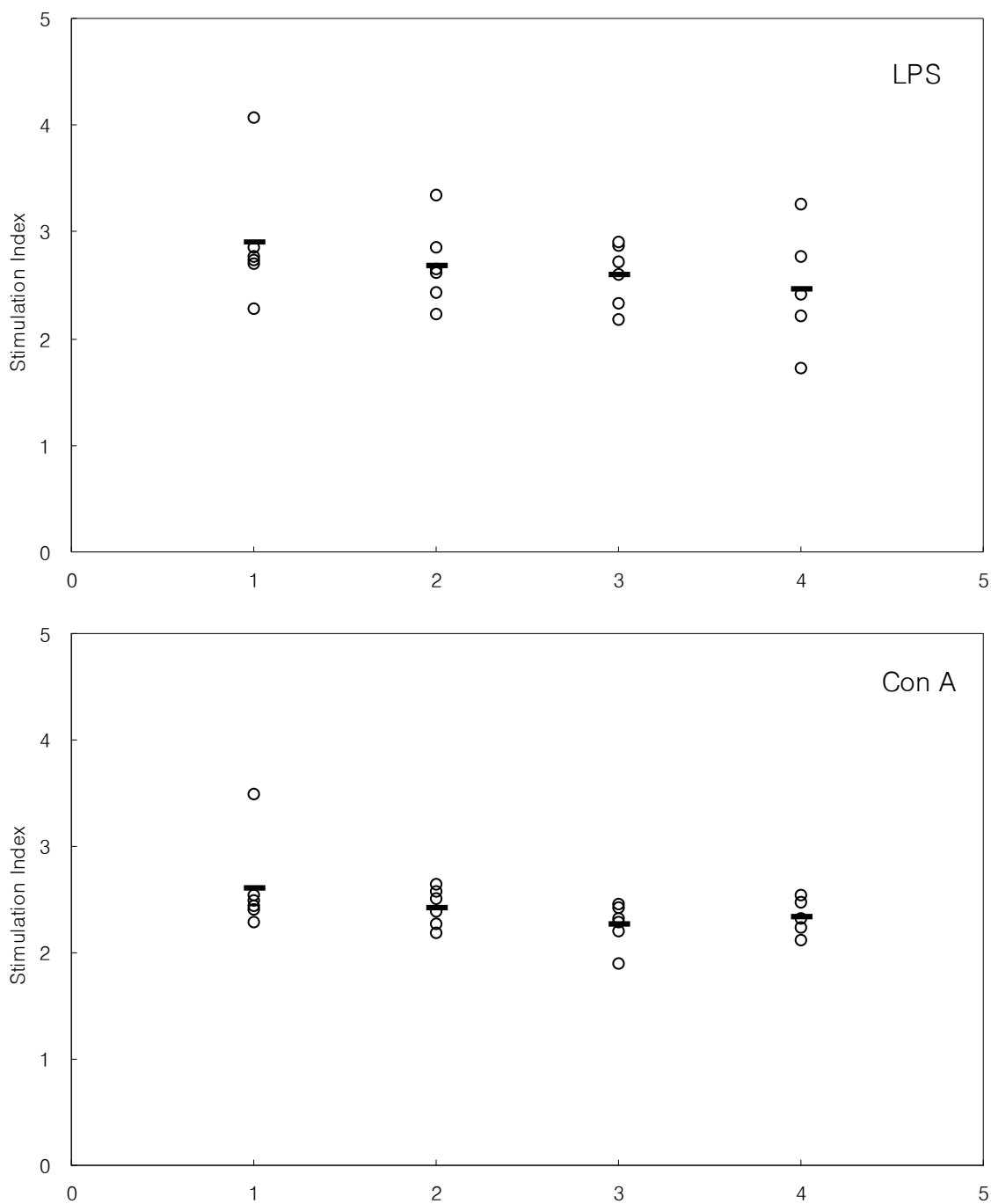


Fig. 4-11. The effect of LPS and Con A on the proliferation of male mice spleen cell. The spleen cells( $5 \times 10^5$  cells well) of male mice during daily administration with  $2,000 \text{ mg kg}^{-1}$  lettuce(2), lettuce- $\text{GeO}_2$ (3), lettuce- $\text{Ge}_{132}$ (4) or its vehicle(1) for 13 weeks were stimulated LPS( $10 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$ ) or Con A( $1 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$ ) for 48 hours.



Table 4–20. Expression of various surface marker on the spleen cells.

Groups	Male			Female			
	CD19(%)	CD4(%)	CD8(%)	CD19(%)	CD4(%)	CD8(5)	
DW	Mouse1	38.5	10.6	7.5	48.7	21.2	13.2
	Mouse2	46.6	15.7	9.7	52.2	20.7	13.3
	Mouse3	46.9	12.3	8.7	44.5	15.5	10.4
	Mouse4	47.9	13.4	8.3	45.4	18.8	14.6
	Mouse5	54.2	18.1	12.7	44.4	19.1	14.0
	Mouse6	55.4	16.6	12	41.0	17.7	11.9
	Means±S.D	48.3±6.1	14.5±2.6	9.8±2.1	46.0±3.9	18.8±1.9	12.9±1.5
Lettuce	Mouse1	45.3	18.1	11.9	44.9	19.5	15.5
	Mouse2	45.5	13.3	8.8	42.3	20.7	14
	Mouse3	42	15.1	8.9	46.6	22.5	17.3
	Mouse4	42.2	11.7	8.4	40.3	23.2	16.9
	Mouse5	45.6	16.7	13.6	44.5	20.3	14.7
	Mouse6	41	10.3	7.5	35.5	16.1	9.1
	Means±S.D	43.6±2.1	14.2±3.0	9.9±2.4	42.4±4.0	20.4±2.5	14.6±3.0
Lettuce -GeO <sub>2</sub>	Mouse1	37.3	9	7.3	33.6	14.4	8.6
	Mouse2	48.9	16.1	11.7			
	Mouse3	43.5	12.6	8.2	45.4	25.7	16.2
	Mouse4	41.1	11.3	7.2			
	Mouse5	37.0	11.5	6.7	43.1	14	9.6
	Mouse6	39.2	12.8	7.7	38.9	23.4	11.9
	Means±S.D	41.2±4.5	12.2±2.3	7.1±1.8	40.7±6.3	18.0±6.6	11.5±4.1
Lettuce Ge -132	Mouse1	43.8	15.4	11.0	38.7	23.8	13.3
	Mouse2				50.1	22.7	12.7
	Mouse3	39.5	12.7	8.0	46.1	19.9	13.1
	Mouse4	51.1	18.5	12.4	49.8	19.0	12.0
	Mouse5	45.5	14.4	10.0	39.2	20.5	12.3
	Mouse6	43.4	15.7	10.1	43	19.3	13.2
	Means±S.D	44.6±4.2	15.3±2.1	10.3±1.6	44.5±5.0	20.9±1.9	12.8±0.5

Surface expression of CD19, CD4, CD8 of spleen cells were analyzed by one colour flow cytometry. Number represent the percentage of single positive cells.

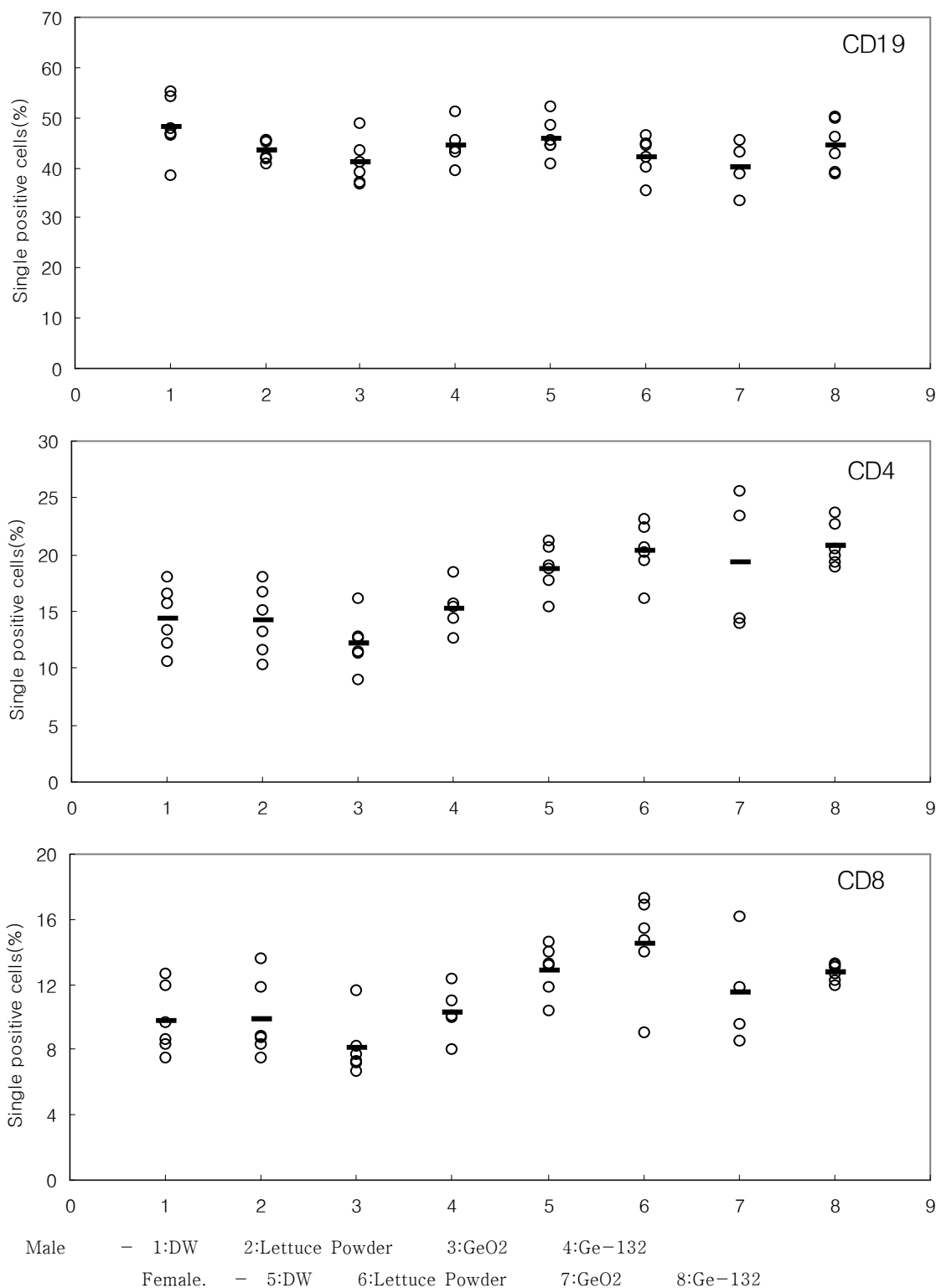


Fig. 4-12. Expression of various surface marker on the mice spleen cells. Surface expression of CD19, CD4, CD8 of spleen cells were analyzed by one colour flow cytometry. Number represent the percentage of single positive cells.

Table 4-21. Effect of organic-germanium lettuce powder on S-180 tumor bearing mice.

Group	Day										MST (Day)	ILS (%)
	1	10	20	21	22	23	24	25	26	27		
DW	10	10	10	10	7	0	0	0	0	0	21.7	-
Lettuce	10	9	9	9	6	3	2	0	0	0	20.9	-3.69
Lettuce-GeO <sub>2</sub>	10	10	10	10	9	5	5	2	1	0	23.2	6.91
Lettuce-Ge <sub>132</sub>	10	10	10	10	8	2	1	0	0	0	22.1	1.84

Mice were administrated 4 weeks for 500 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce, lettuce-GeO<sub>2</sub>, or lettuce-Ge<sub>132</sub> lettuce powder, or its vehicle and injected S-180(3×10<sup>6</sup> 300μL) tumor cells.

$$\text{ILS(Increase in MST over control)} = \frac{\text{Test group MST}}{\text{Control group MST} - 1} \times 100$$

MST: mean survival time

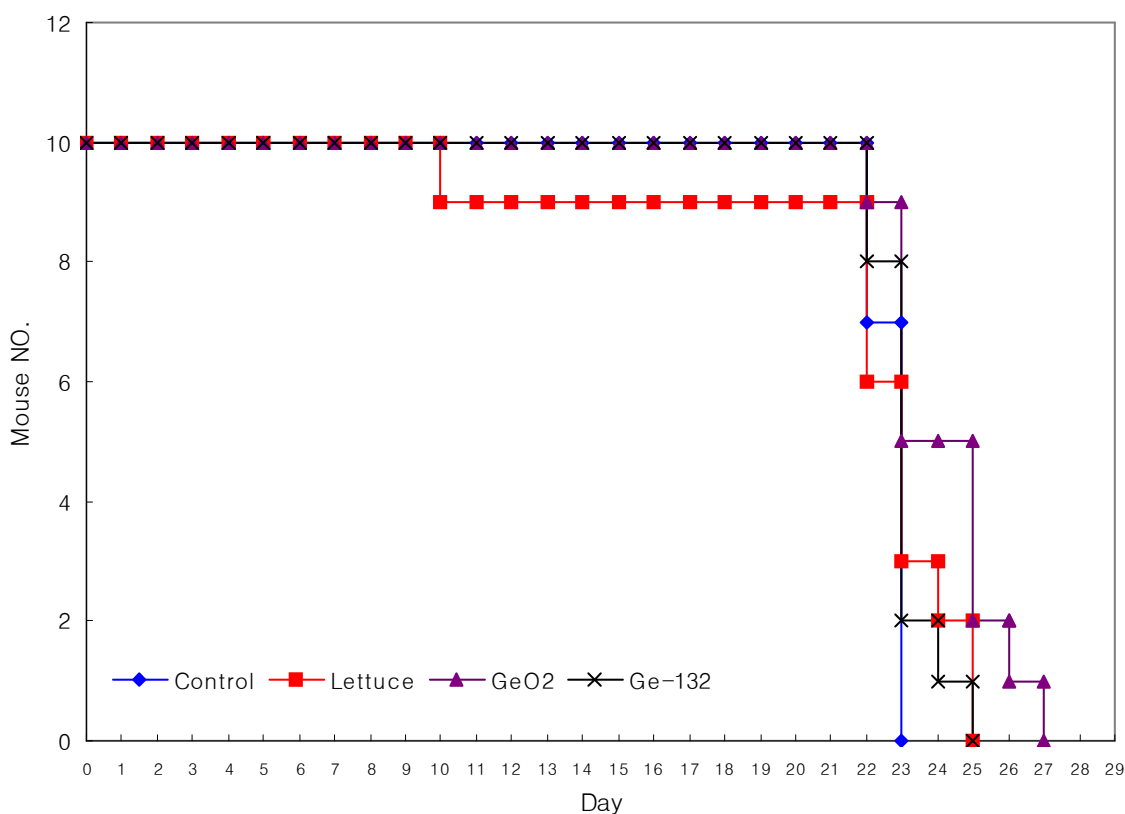


Fig. 4-13. Effect of organic-germanium lettuce powder on S-180 tumor bearing mice. Mice were administrated 4 weeks for 500 mg kg<sup>-1</sup> of lettuce, lettuce-GeO<sub>2</sub>, or lettuce-Ge<sub>132</sub> lettuce powder, or its vehicle and injected S-180(3×10<sup>6</sup> 300μL<sup>-1</sup>) tumor cells.

#### 4. 연구결과 요약

유기게르마늄과 무기게르마늄을 첨가하여 양액 재배한 상추의 장기적 투여에 대한 안전성을 평가하기 위하여 게르마늄 함유 상추의 생쥐(C57BL/6)에 대한 반복 경구투여 독성시험을 수행하였다. 실험 전 기간인 13주 동안 사망한 실험동물은 없었으며, 일반증상과 임상증상도 관찰되지 않았고, 부검 결과 어떠한 육안적 병변도 관찰되지 않았다. 그리고 대조군과 시료 투여군 간의 체중 차이도 관찰되지 않았다. 암컷의 사료 소비량과 물 섭취량은 수컷에 비해 약간 적은 것으로 나타났다. 장기무게의 경우에도 절대적인 무게와 상대적인 무게를 비교한 결과, 암수 각 실험군에서 대조군에 비해 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 흉선의 경우에 암컷의 평균적인 무게가 수컷에 비해 약간 무거운 것으로 나타났고, 심장과 좌우 신장의 무게는 암컷에 비해 수컷의 경우에 약간 무거운 것으로 나타났다. 그리고 뇌와 흉선의 상대적 무게가 수컷에 비해 암컷이 무거운 것으로 나타났다. 혈액 생화학적 검사 및 혈액학적 결과에서 암수 모두 대조군에 비해 각 실험군의 측정값에 유의한 변화는 없는 것으로 나타났다. LPS와 Con A 자극에 대해 비장세포의 증식반응과, 비장세포 내 B세포, 보조 T세포, 세포독성 T세포의 비율은 유의한 차이가 없었다. 각 시료를 4주간 매일 투여하고 복수암세포를 생쥐 복강에 투여하여 항종양효과를 관찰한 결과  $\text{GeO}_2$ 를 함유한 상추 분말을 투여한 실험군에서 생존일수중양치(MST)와 연명율(ILS)이 증가하는 것을 확인하였다. 이상의 실험 결과로  $\text{GeO}_2$ 와  $\text{Ge}_{132}$  ( $500 \text{ mg kg}^{-1}$ )를 함유한 상추 분말을 13주간 매일 경구 투여하였을 때, 시료와 관련된 특기할만한 독성증상이 관찰되지 않았다.

## 제 5절 게르마늄 함유 친환경 농자재 제조기술 개발

### I. 게르마늄관련 문헌 자료 정리 및 게르마늄 농자재 수집 분석

#### 1. 게르마늄관련 자료 정리

게르마늄은 1886년 Clemens Winkler가 argyrodite라는 광석에서 최초로 발견한 원소로서 Germania에서 그 어원을 가져 왔다. 게르마늄은 원소주기율표에 C, Si, Sn, Pb와 함께 4A족에 속하는 연성과 전성이 없는 비금속 물질로서 반도체, 컴퓨터 및 전기공학 분야에 널리 사용되어 왔다. 게르마늄은 원자번호 32번, 원자량 72.59, 비중 5.323, 최외각 전자는  $4s^2 4p^2$ 를 가지며 녹는점 (melting point)과 끓는점(boiling point)은 각각 937.4, 2,830°C의 화학적 특성을 가지고 있다. 자연상태에서 게르마늄 동위원소의 질량수는 70, 72, 73, 74, 76 이며 각각 21%, 27%, 8%, 37%, 8% 정도 존재하고 있다

게르마늄은 지각중 평균  $7.0 \text{ mg kg}^{-1}$  차지하고 있으며, 보통  $1.0-1.7 \text{ mg kg}^{-1}$  범위 정도를 함유하고 있다 (Merian 등, 199; Bernstein등, 1985). 지표의 풍화과정에서 게르마늄은 어느 정도의 이동성을 가지지만,  $\text{Ge(OH)}_4$ , 점토광물, Fe oxide, 유기물질, coal에 흡착하여 재결정을 이루며 존재하고 있다. 지표에서 게르마늄은 4+, 2+로 존재하지만  $\text{HGeO}_2^-$ ,  $\text{HGeO}_3^-$ ,  $\text{GeO}_3^{2-}$ ,  $\text{GeS}^{2-}$ 와 같은 형태로도 존재한다(Pendias, A. K. 등, 1984). 게르마늄은 이온 자체로 존재하기 보다는 대부분 sulfosalt 형태로 존재한다(Merian 등, 1991). 가장 대표적인 게르마늄 광산은 남아프리카공화국의 Tsumeb 광산과 콩고의 Prince-Leopold 광산으로서 이들 지역에서 게르마늄에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다(Bernstein, L. R. 등, 1985). 지각을 이루는 여러 암석중에 함유되어 있는 게르마늄의 함량은 Table 1에서 보는 바와 같다 (Bernstein등, 1985). 게르마늄은 최근까지 마그마 분화활동이 일어난 지역이나 휘발성 물질들이 농축된 지역에서도 높은 농도를 나타내며(Bernstein등, 1985), pegmatite, 황옥, 운모로 이루어진 greisen에 게르마늄이 상당량 존재한다. 퇴적암의 탄산염 성분으로 이루어진 암석은 상대적으로 게르마늄 함량이 적고 (Pendias, A. K. 등, 1984Bernstein L. R. 등, 1985) shale의 경우 유기물을 함유하고 있을 때 게르마늄 함량이 많은 것으로 알려지고 있다(Burton, J. D 등, 1959).

Table 5-1. Abundance of germanium in various terrestrial materials.

Terrestrial material		Mean Ge (mg kg <sup>-1</sup> )	Range Ge (mg kg <sup>-1</sup> )
Bulk earth		13.8	
Crust		1.4	1.0 - 1.7
Igneous rock	Granitic & Intermediate	1.5	0.5 - 4.0
	Mafic	1.4	0.7 - 3.1
	Ultramafic	0.91	0.55 - 1.6
Sedimentary	Siliceous	1.4	0.2 - 3.3
	Carbonate	0.09	0.03 - 0.17
Metamorphic rock	Siliceous	1.7	0.8 - 8.0
	Siliceous ooze	1.7	1.1 - 2.2
Deep sea sediment	Carbonate ooze	0.3	0.0 - 1.4
	Clays	2.1	1.4 - 2.8
	Manganese nodules	2.5	1.8 - 3.2

게르마늄은 주로 규산염 광물에서 게르마늄과 실리콘 사이의 치환에 의해 다량으로 분포하고 있지만 산화광물, 수산화광물, 철-니켈 우석이나 광물, 황화광물, 황산염광물, 할로겐광물, 탄산염광물, 석탄, 페그마타이트 등과 같은 비규산염 광물에도 존재한다. 게르마늄은 규산염광물, 황화광물에서 Zn, Cu, As, Fe와 치환이 일어나는데(Bernstein 등, 1985; Vlasov 등, 1966), 그 중 게르마늄과 실리콘의 치환은 게르마늄의 가장 큰 특징이라 할 수 있다. 실리콘과 게르마늄은 같은 4족 원소이면서 비슷한 이온 반지름(Ge : 0.39 Å, Si : 0.26 Å)과 공유결합 반경 (Ge : 1.22 Å, Si : 1.17 Å)을 가지며 비슷한 화학적 특성으로 인해 서로 간에 치환이 일어난다. 지각을 구성하는 성분 중에 Ge/Si 비는 어느 지역이나 거의 일정하게  $1.3 \times 10^{-6}$ 인 것으로 알려져 있다. 게르마늄은 실리콘과 같이 4면체, 8면체의 결정형태를 띠고 있는데 주로 4면체를 이루고 있으며, 4면체 규산염광물중에서도 상대적으로 약한 힘으로 연결되어진 광물인 휘석과 감람석이 석영, 장석 보다 실리콘과 게르마늄 간의 치환이 잘 이루어지고, Ge/Si ratio도 높다(Bernstein 등, 1985). Table 2는 게르마늄을 주 원소로 함유하는 광물을 나타내었다(Bernstein 등, 1985).

Table 5-2. Minerals containing essential germanium.

	Mineral	Formula
Sulfide	Argyrodite	Ag <sub>8</sub> GeS <sub>6</sub>
	Briartite	Cu <sub>2</sub> (Fe,Zn)GeS <sub>4</sub>
	Germanite	Cu <sub>11</sub> Ge(Cu,Zn,Fe,Ge,W,Mo,As,V) <sub>4-6</sub> S <sub>16</sub>
	Renierite	Cu <sub>10</sub> (Zn <sub>1-x</sub> Cu <sub>x</sub> )Ge <sub>2-x</sub> As <sub>x</sub> Fe <sub>4</sub> S <sub>16</sub>
	Unnamed	GeS <sub>2</sub>
Germanate /Oxide	Argutite	GeO <sub>2</sub>
	Bartelkeite	PbFe <sub>2</sub> +Ge <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
	Brunogeierite	Fe <sub>2</sub> GeO <sub>4</sub>
	Carboirite	FeAl <sub>2</sub> GeO <sub>5</sub> (OH) <sub>2</sub>
	Ge-lepidomelane	(K,Na,H <sub>3</sub> O) <sub>2</sub> Fe <sub>6</sub> (Ge <sub>5</sub> Al <sub>3</sub> )O <sub>20</sub> (Cl <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> )
Hydroxide	Otjisumeite	PbGe <sub>4</sub> O <sub>9</sub>
	Mangan-stottite	Mn <sup>2+</sup> Ge(OH) <sub>6</sub>
Sulfate	Stottite	Fe <sup>2+</sup> Ge(OH) <sub>6</sub>
	Itoite	PbGe(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>
	Fleischerite	Pb <sub>3</sub> Ge(OH) <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O
	Schaurteite	Ca <sub>3</sub> Ge(OH) <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O

미국 일대의 표토에 함유되어 있는 게르마늄의 함량은 평균 1.1 mg kg<sup>-1</sup> 정도로 거의 일정한 것으로 알려져 있으며 이는 지각의 평균 게르마늄 함량과 비교했을 때 거의 유사한 값으로 전 세계적으로도 이와 유사한 값을 가질 가능성이 높다고 하였다(Pendias, A. K. 등, 1984). 그러나 우리나라 토양중 게르마늄 함량분석 연구로 충남 금산군의 반암과 화강암지역 암석과 인삼밭토양, 산토양에 함유된 게르마늄 함량을 분석한 보고가 있는데, 반암지역은 0.10, 0.54, 0.58 mg kg<sup>-1</sup> 이었고 화강암의 경우는 0.30, 0.59, 0.76 mg kg<sup>-1</sup> 이라고 보고하였으며(전호식, 2000), 이 자료 외에는 토양중 게르마늄 함량 분석에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

최근 보양, 강장작용이 있는 약초인 인삼, 영지 마늘, 알로에, 컴프리를 비롯한 여러 생약들이 비교적 많은 양의 유기게르마늄을 함유하고 있는 것으로 알려져 있다. 이들 약용식물들은 토양에 함유된 게르마늄을 흡수하여 식물체내에 유기게르마늄 형태로 비교적 많은 양을 함유하고 있다는 것이 밝혀져 있다(Kim 등, 1998; 淺井一彦, 1975; Goto, H. 1989). Conner와 Shacklette는 식물 재에 평균 20 mg kg<sup>-1</sup> 정도의 높은 게르마늄이 함유되어 있다고 하였다. 식물에 들어있는 게르마늄의 함량은 0.1-1.0 mg kg<sup>-1</sup> 이나 약용으로 쓰이는 작물에는 게르마늄 함량이 높은 편이다(Merian 등, 1991). 석탄이 다른 광물보다 게르마늄의 함량이 높은 이유도 석탄의 주성분인 식물유체에 의한 것으로 알려져 있다(Manskaya 등, 1968).

벼는 게르마늄을 쉽게 축적하는 농작물로 최고 약 1% 정도까지 높은 게르마늄이 함유된 것도 있다고 보고하였다(Pendias, A. K. 등, 1984). Yang(2001)은 식물체중의 게르마늄을 정량한 결과는 White mushroom이 0.088 mg kg<sup>-1</sup>, Ganoderma 0.145 mg kg<sup>-1</sup>, Tremella 0.071 mg/kg, Ginseng 0.082 mg/kg, Chrysanthemum 0.075 mg kg<sup>-1</sup>, Ginkgo 0.084 mg kg<sup>-1</sup> 이라고 하였다.

우리나라 농작물중 게르마늄 함량에 대한 연구로 충남 금산군 반암 지역의 경우 인삼 0.022 mg kg<sup>-1</sup>, 벼 0.539 mg kg<sup>-1</sup>, 콩잎 0.029 mg kg<sup>-1</sup>, 깻잎 0.049 mg kg<sup>-1</sup> 으로 나타났고, 화강암지역의 경우 인삼 0.003 mg kg<sup>-1</sup>, 벼 0.001 mg kg<sup>-1</sup>, 고추 0.019 mg kg<sup>-1</sup> 함유하고 있다고 하였다(전호식, 2000). Jeong(1998)은 국내산 약용식물인 신선초와 인삼에 대해 게르마늄 함량을 분석하였으며 신선초의 경우 수집지역에 따라 29.7-385.7 mg kg<sup>-1</sup> 으로 함량에 차이가 심하다고 하였다. 이는 재배되는 지역적 특성과 생육환경, 시료의 채취시기 등에 의한 영향일 것으로 추정하였으며, 5년된 인삼의 경우는 83.2 mg kg<sup>-1</sup> 으로 신선초 보다는 함량이 낮았다. 이외에 우리나라 토양과 농작물의 게르마늄 함량 분석에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

수계에 존재하는 게르마늄은 pH의 영향을 받게되는데 pH가 낮을수록 게르마늄의 농도는 높다. 하지만 게르마늄도 다른 원소와 마찬가지로 pH외에 주변환경, 즉 강이나 시내 주변을 이루고 있는 광물이나, 식물 등에 영향을 받게 되어 수계의 게르마늄의 농도가 영향을 받게 된다(Froelich, P. N. Jr. 등, 1981).

Table 5-3. Concentrations of germanium in mineral water and ground water in Korea.

Sampling area	Concentration(ppb)
Yangju-gun(Kyonggi-do)	0.75
Mt. Ssong ni(Chungcheongbuk-do)	3.16
Pochun gun(Kyonggi-do)	0.46
Chongwon-gun(Chungcheongbuk-do)	0.46
Mt. Ji ri(Hadong-gun, Gyeonsangnam-do)	1.39
Hongcheon-gun(Kangwon-do)	2.83
Chongwon-gun(Chungcheongbuk-do)	1.73
Mt. O dae	0.84
Inje-gun(Kangwon-do)	1.84
Namyangju-city(Kyonggi-do)	1.24
Gapyeong-gun(Kyonggi-do)	1.21

\* : Not published data of KBSI



게르마늄은 하천보다는 바닷물에서 농도가 높다. 이는 해양지각에서 계속적으로 일어나고 있는 열수작용(hydrothermal process)에 의한 것으로 제시되었다 (Froelich, P. N. Jr. 등, 1981; Lewis B. L. 등, 1985). Table 3-3은 우리나라 샘물과 지하수에 용존되어 있는 게르마늄 농도에 대한 자료이다.

토양, 농작물 및 수계에서의 게르마늄 함량이 매우 낮아 게르마늄을 정확히 분석하기 위한 다양한 방법들이 사용되었다. 게르마늄 분석법으로는 spectrophotometer를 이용한 발색법(Choi 등, 1992), 원자흡광분광법(Han 등, 1997), Gas chromatography(Choi 등, 1992)이 있으나 검출한계 및 재현성에 있어서 단점이 있다. 최근에는 Gas chromatography(Park, M. K. 등, 1995), 수소화물유도결합 플라즈마분광법(김선태 등, 1988), Osteryoung Wave Voltammetry법(Joe, S. K. 2001), Differential Pulse Polarography(Shin, H. S. 등, 1996), Adsorption Stripping Voltammetry법(Jeong, S. I. 등, 1998) 등이 이용되어 분석감도가 크게 향상되어 극 미량까지 측정할 수 있는 단계에 이르렀다. 그러나 게르마늄은 전처리시 회화과정의 낮은 온도에서도 휘발성인 GeO나 GeS로 되어 손실을 일으키므로 matrix modifier를 사용해서 분석해야만 한다고 하였다(Nagata, N. 등, 1985). 또 Gleim(Gleim P. S. 1982)의 보고에 의하면 분해시 분해액의 염소기와 결합하면 GeCl<sub>4</sub>가 되어 비등점(84.0°C)이 낮아지므로 높은 온도로 분해할 경우 휘발하기 쉽기 때문에 분해온도의 영향을 받는다고 주장하여 게르마늄 분석시 첨단기기를 사용하는 것도 필수이지만 전처리 과정이 매우 중요함을 알수있다. 실제 인삼을 가지고 여러 연구자들이 게르마늄 함량을 분석하였는데 Table 3-4에서 보는 바와 같이 분석자들이 어떤 기기를 사용했느냐에 따라 게르마늄 함량에 차이가 심하였다.

Table 5-4. Concentration of germanium in ginseng radix by several researchers (김선태 등, 1988)

Analyst	Concentration(mg kg <sup>-1</sup> )	Analytical method
Asai	250-320	-
Fujimura	60	UV-VIS
Ninomiya	0.64	UV-VIS
Park et al.	97-307	Flameless AA
Mino et al.	<0.001-0.006	Flameless AA
Sitamura et al.	0.007	AA
Kim et al.		ICP
Fresh ginseng	<0.0012-0.01	
White Ginseng	0.002-0.009	

Park(1995) 은 원자흡광분광광도계 기기를 사용하여 분석하였는데 인삼의 게르마늄 함량이 97-307 mg kg<sup>-1</sup> 이었으며, Fujimura (藤村 みつ子, 1979)는 UV-Vis spectrophotometer를 사용

하였는데  $60 \text{ mg kg}^{-1}$  이었고, Kim (1998) 등은 ICP를 이용하여 분석하였더니  $0.007 \text{ mg kg}^{-1}$  함유하고 있다고 하였다. 최근에는 게르마늄 분석에 있어서 최첨단 기기를 사용함으로써 분석 기기에 대한 오차는 줄어들었지만 전처리 과정에서 오차가 많이 나므로 게르마늄의 효율적인 분석을 위한 전처리방법 연구가 필요한 실정이다.

게르마늄의 의학적인 효능이 처음 알려진 것은 1930년 프랑스와 스페인의 국경지방인 Lourdes의 샘물이 여러 가지 질병치료에 효과가 있다고 하여 샘물의 성분 분석결과 게르마늄 함량이 매우 높다는 사실이 알려지면서 부터이다.

게르마늄은 무기게르마늄과 유기게르마늄으로 분류할수 있다. 게르마늄의 독성연구로는 합성한 무기게르마늄( $\text{GeO}_2$ )을 장기 복용한 환자에서 빈혈, 신기능장애, 신경병증, 근장애를 유발하는 것으로 알려져 있으며(Obara 등, 1991; Iijima 등, 1990), 랫드에서도 신기능 장애와 근장애를 일으키는 것으로 보고되었다(Higuchi, I. 등, 1991; Sanai T. 등, 1990). Sanai (1990; 1991; 1991)의 연구보고에 의하면 6주된 수컷 rat를 사용하여  $\text{GeO}_2$   $150 \text{ mg kg}^{-1}$ 을 매일 13주 동안 경구투여한 처리구의 rat는 체중이 감소하고 신장, 심장 및 간에 게르마늄이 축적되었으며, 특히 신장에  $116.6 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 가장 많이 축적되었으며, 간과 심장에는 각각  $44.2$ ,  $17.8 \text{ mg kg}^{-1}$ 이 축적되었다. Schauss(1991)도 게르마늄을 먹인 쥐의 신장에는 게르마늄 함량이 높았다고 하였으며, Nagata등(1985)도  $\text{GeO}_2$ 를 장기 복용한 여자 성인의 경우 신장 및 다른 기관에서 게르마늄이 발견되었으며,  $\text{GeO}_2$ 가 신장독성을 유발할 수 있다고 보고하였다.

반면, 1967년 Asai Germanium Research Institute에서 무기물인 이산화게르마늄으로부터 합성한 유기게르마늄인 Ge-132(carboxyethylgermanium sesquioxide)를 독성실험한 결과 JCL-Wistar 랫드에  $0.556-5 \text{ g kg}^{-1}$ 의 용량을 3개월 동안 경구투여시 특이할 만한 독성증상을 나타내지 않았다. 단  $5 \text{ g kg}^{-1}$  투여군에서 설사, 연변, 체중감소, 시료섭취량 감소, 음수량증가, 뇨량 증가와 같은 증상을 보였으며, 최대 무해용량은  $1.667 \text{ g kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 인 것으로 보고되었다(Sugiya, Y. 등, 1986; Evans 등, 1970). Beagle Dog에 대한 만성독성시험에서도  $125-500 \text{ mg/kg}$ 의 용량 투여시 독성증상은 없었다고 하였으며(Nagata, T. 등, 1978), JCL-Wistar 랫드에 대한 생식독성·최기형성 시험에서도  $0.25-1 \text{ g kg}^{-1}$ 의 용량을 투여시 특이할만한 독성을 나타내지 않았으며, 최대무해용량이  $1 \text{ g kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$  이상인 것으로 보고되었다(Sugiya, Y. 등, 1986; Nagai, H. 등, 1980).

유기게르마늄의 약리효과에 관한 연구는 매우 많으며 다음과 같은 효과가 있다고 보고 되어 있다.

- 1) 인터페론생성 증대 및 항종양 효과(Ishiwata, Y. 등, 1990; Jang, J. 등, 1991; Jao S.w. 등, 1990; Rice L 등, 1974; Slavik M 등, 1982)
- 2) 면역력 강화 작용 및 virus감염의 치료효과(Kumano, N., 등 1985; Aso 등, 1985; Ishiwata, Y. 등, 1990; Ishiwata, Y. 등. 1998; Nakada, Y. 등, 1993)

- 3) 항염증, 항관절염 및 골다공증 치료효과(Sasaki 등, 1984; Nakamura T. 등, 1987; Orimo H. 등, 1985; Watanabe M. 등, 1986; Fujii, A. 등, 1993)
- 4) 중금속 해독작용(Lee 등, 1991)
- 5) 산소공급 증대 및 운동성 증가(Ho, C 등, 1990; Ohotta T. 1984; Warburd O., 1996; Gondman S. 1988)
- 6) 돌연변이 억제작용 (Mochizuki 등, 1982; Gondman S. 1988)
- 7) 해열·진통 작용(Suzuki, Y. 등, 1983; Komuro 등, 1986)

인터페론 생성 및 항종양효과에 대한 연구로(AsoAso 등, 1985; Aso, H. 등, 1989), Suzuki(1986, 1989, 1985, 1985)는 유기게르마늄이 interferon induction, antitumor activity, NK cell activity 증가, cytotoxic macrophage의 생성 등 다양한 생물학적 약리효과를 가지고 있다고 하였으며, Ohotta(Ohotta T. 1984)는 게르마늄이 반도체 성질을 가져 electronic level에서 유전적 발현을 조절함으로써 암세포막의 잠재적 활성을 감소시키고 암세포가 증대되는 것을 방해한다고 하였다. 게르마늄이 항암효과가 있었던 이유는 1, 2-Dimethylhydrazine이 발암물질로 작용하기 위해서는 azomethane, azoxymethane을 거치는데 이때 oxidation이 필요한데 게르마늄은 이 단계를 저지함으로써 발암활성을 저하시켰다고 하였다(Jao S.w. 등, 1990).

Propagermanium은  $[(O_{1/2})_3GeCH_2CH_2CO_2H]_n$ 의 화학적 구조를 가진 유기게르마늄화합물로 일본에서는 B형 간염환자의 치료제로 사용되어져 왔다. 또 propagermanium은 바이러스에 감염된 쥐에서  $\alpha$ ,  $\beta$  및  $\gamma$ -interferon의 생성을 증가시켰다고 하였다(Ishiwata, Y. 등, 1990). 2, 5-oligoadenylate synthetase는 인터페론의 양을 측정하기 위한 enzyme maker로 사용되기도 하는데 특히 적은량의 인터페론을 정량하는데 사용되어진다(Ishiwata, Y. 등, 1990).

Spirogermanium은 spirane 구조의 1-carbon 일부분이 금속 게르마늄으로 치환된 azaspirane 화합물의 하나로 생물학적 활성을 향상시킨 항암약이며(Rice L 등, 1974; Slavik M 등, 1982), macrophage의 활성증대, 항관절염 및 면역조절제로서 역할을 한다고 하였으며, macrophage의 활성증대로 superoxide( $O_2^-$ )의 생성도 감소시켰다. Spirogermanium의 작용기작이 아직 확실히 밝혀지지 않는지만 DNA, RNA, protein 생합성 저해로 이해하는 것이 가장 지배적이다(Hill BT 등, 1982).

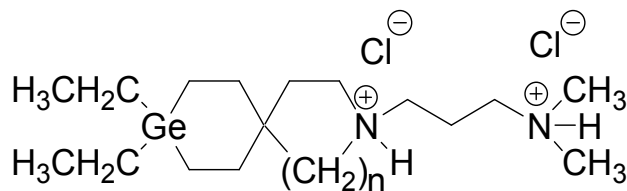


Fig 5-1. Chemical structure of spirogermanium.

면역력 강화 및 항virus 효과와 관련한 연구로 natural killer(NK) cell은 대과립 임파구(large granular lymphocyte : LGL)의 일종으로 MHC(major histocompatibility complex)와 무관한 비

특이적으로 각종 종양세포와 virus 감염세포에 대하여 세포 살해성으로 작용하는 것으로 보고 되고 있으며(Ahn, Y. K. 등, 1989; Talmadge 등, 1980), 또한 interferon등에 의해 NK cell 자신도 활성이 증가된다고 보고되었다(Hanna 등, 1980). Ge-132는 gamma interferon을 유발하여 수술후 면역학적 조절기능을 한다고 하였다(Nakada, Y. 등, 1993). Ge-132, 유기게르마늄 화합물은 쥐동물 실험에서 암세포 생육억제 및 평균 생존시간의 증가 등으로 항암효과가 있는 것으로 알려졌다(Kumano, N., 등 1985; Kumano 등, 1978; Suzuki, Y. 등, 1983; Aso, H. 등, 1989).

골다공증 치료효과에 관한 연구로 Ge-132는 골아세포의 활성을 증대하는 약리효과(Nakamura T. 등, 1987;Orimo H. 등, 1985;Watanabe M. 등, 1986)와 고령자 골다공증에 있어서 미네랄 분해 억제 및 생물학적 반응조절제와 같은 효과를 가지고 있다. Fujii(1993)의 보고에 의하면 암컷 쥐의 난소를 적출한 다음 Ge-132를 투여하였더니 투여하지 않은 처리구와 비교하여 대퇴골의 횡압강도가 증가하였고, 뼈의 질량이 증가되었다고 보고하였다.

게르마늄은 중금속 해독작용에도 관여하는 것으로 알려져 있다. 카드뮴이 체내에 유입되면 적혈구와 결합하여 혈중내로 이행되어지는데 혈장 내에선 고분자 단백질 특히 알부민과 결합되고, 일부는 thionein과 결합하여 metallothionein을 형성하므로 각 장기에 이행되어진다(Kowel 등, 1979). 체내에 유입된 카드뮴의 체내 총량중 약 50%는 주로 간장과 신장에 축적되어도 뚜렷한 독성효과가 나타나지 않는 것은 metallothionein(MT) 형성에 기인한다고 알려져 있다. 일반적으로 생체 내에 유행성 중금속이 유입되었을 경우 자체해독기전으로 배설이 용이한 MT을 형성하는 것으로 보고되고 있다. MT는 생체중에 간장, 신장, 비장 및 실질조직 등에 주로 존재하며, cysteine을 다량 함유하고 있는 저 분자량의 수용성 단백질로서 -SH(sulfhydry)기가 Cd, Zn, Hg 및 Cu등과 같은 중금속들을 포함하여 간장 및 신장 등의 기능을 보호하는 것으로 보고되었다(Evans 등, 1970). Lee와 Chung은 유기게르마늄 투여로 카드뮴의 간장독성에 대해 metallothionein 형성을 촉진시키므로 카드뮴의 독성을 감소 시켰다고 하였다.

유기게르마늄의 해독작용으로 Ge-132는 rat의 간 cytosolic glutathion S-transferase(GST)의 활성에도 영향을 주어 Ge-132를 투여하였을 때 GST의 활성은 증가시켜 조직내 glutathione의 함량 변동은 ethacrynic acid 투여로 억제되던 것이 Ge-132의 전처리로 ethacrynic acid 단독 투여군 보다 증가되었다.

유기게르마늄의 산소공급 증대효과도 알려져 있는데 게르마늄은 쉽게 H<sup>+</sup>와 결합해서 배출하고 O<sub>2</sub>의 이용을 최소화함으로써 신체기관에 산소를 많이 가지게 되고 건강을 유지하게 되는 것이다(Ohotta T. 1984;Gondman S. 1988). Warburg(1996)는 정상적인 세포에 비해 암세포에는 산소가 결핍되어 있다는 것을 주장하여 노벨상을 수상하기도 하였다.

돌연변이 억제 효과로도 작용하는데 유기게르마늄은 free radical scavenger의 역할도 한다.

게르마늄은  $O^-$ 와 쉽게 반응하여 항산화효과를 가진다. 불안정한 성질을 가진 free radical인  $O^-$ 은 DNA 돌연변이를 일으킬 뿐만 아니라 질병을 일으키고, 노화를 일으키는 주된 요인이다 (Gondman S. 1988).

그러나 모든 유기게르마늄이 약리효과를 나타내는 것은 아니다. Germanium-lactate-citrate를 복용한 환자에서 신부전증과 간종(肝腫)과 같은 독성이 유발되었으며, sanumgerman은 마우스에서 카테콜아민과 세르토닌 신경계의 활성을 억제한다고 보고되었다(Van der Spoel 등, 1991; Raisin, J. 등, 1992).

최근에 게르마늄과 함께 기능성 원소로 셀레늄(Se)이 있다. 1973년에 Rotruck(1973)등이 셀레늄이 glutathione peroxidase(GSHPx)라는 항산화 효소 필수 구성성분으로 작용한다는 것을 발견함으로써 셀레늄의 항산화 작용 기전에 관한 문제가 해결되었다. 그 후 Forstrom(Forstrom JW 등, 1978)은 셀레늄이 이 효소의 activity sited selenocysteine으로 존재한다는 것을 밝혔다. 셀레늄은 방법은 다르지만 세포막에 존재하는 비타민 E처럼 지방의 과산화(peroxidation)를 막아서 세포내부나 세포막의 기능이 손상되는 것을 막기 때문에 영양면에서 비타민 E의 손실을 줄이는 효과를 갖게된다.

한편, 역학조사에 의하면 셀레늄이 토양에 적게 함유된 지역에서 유방암과 대장암 등의 발발률이 높게 나타나서 셀레늄 부족과 암과의 연관성에 대해서도 연구가 진행되고 있다(Cowgill UM. 1983). 동물 실험의 경우 동물의 식이에 고농도의 셀레늄( $1-8 \text{ mg kg}^{-1}$ )을 첨가할 경우, 여러 가지 발암 물질이나 바이러스로 유도된 암의 발발률을 낮춘다는 보고가 있다(Liu J 등, 1991). 유기 셀레늄 화합물인 selenomethionine과 selenocysteine 그리고 대부분의 식물성 식품에 존재하는 셀레늄은 다른 동물성 식품들보다 체내에서의 이용도(bioavailability)가 좋은 편이다. Kumpulainen(Kumpulainen J 등, 1985)등은 유기화합물인 selenium yeast를 식사에 보충하는 것이 무기화합물인 sodium selenite을 보충하는 것보다 모유의 셀레늄 농도를 증가 시키는데 더 도움이 된다고 하였다. 미국과 스웨덴은 셀레늄을 영양 권장량 항목에 포함시키고 있다 (Food and Nutrition Board National Research Council Recommended Dietary Allowances 10th ed Washington, DC National Academy Press, 1989; Funk M 등, 1990).

이에 반해 게르마늄은 독성, 안전성 및 약리효과 등에 관한 연구는 많이 되어 있지만 셀레늄만큼 다양한 기능성 식품이 나오지 않고 있으며, 영양 권장량으로 설정되어 있지 않은 실정이다.

지각에 게르마늄은 낮은 농도로 존재하기 때문에 연구자들은 효과적인 농축의 수단으로 무기게르마늄을 이용하여 유기게르마늄화 하기위한 다양한 연구들이 수행되었는데, 유기화하기 위한 수단으로는 미생물, 효모 (Kehlbeck, H. 1983; Nobohiro, W. 등, 1980; Wei, X. S. 1992), 녹조류 및 규조류를 이용하기도 하였으며, 몇몇 연구자는 유기게르마늄함유 식물체를 개발하기 위하여 벼(Lee, J. H. 등, 1997), 명일엽, 일당귀와 인삼(Lee, M. S. 등, 1994; Lee, M. S. 등,

1995), 강활(Park, B. W. 등, 1996)을 이용하기도 하였다.

미생물을 이용한 유기게르마늄 생산은 Cho(1998)와 Klappinska(1986) 등에 의해 시도 되어졌다. Klappinska(1986)등은 *Pseudomonas putida*를 배양하여 cell에 흡착된 게르마늄의 분포를 분석한 결과 주로 상등용액인 핵산이나 단백질 부분인 soluble fraction에 83.4% 분포하였고, 17%는 세포막을 구성하는 성분인 polyphosphate, polysaccharide, lipid의 insoluble fraction에 분포하고 있었다고 하였다. 미생물 cell내의 유기게르마늄의 축적은 Klappinska(1986)등이 *Pseudomonase putida* cell내에서 게르마늄의 축적은 주로 soluble fraction에서 이루어지고, 이 중 대다수가 nucleic acid와 protein에 결합되어 있다는 것을 전자현미경 분석을 통해 확인하였다. 세포내의 축적기구는 germanium catechol complex로 되어 유도적인 catechol trasport system을 이용한다고(Klappinska, B. 등, 1986; Chemielowski, J. 등, 1986) 보고되고 있다. Cho(Cho, B. C. 1998)는 *Candida*, *Rhodotorula*의 낮은 Ge 축적에 비해 *Bacillus*속 균주가 고농도의 Ge축적을 보인다는 보고에 따라(Van Dyke M. I. 등, 1989; Robin, M. Slawson 등, 1992) *Bacillus*의 대량 분리원으로 전통적인 콩발효식품을 수집, 건강식품소재로서 약리활성 및 유용성을 가진 Ge함유 균체로 만들기 위해 한국의 청국장, 일본의 Natto 및 인도네시아 자카르타 Tempe를 미생물 분리원으로 사용했다. 생육대수기에 6% Glucose의 첨가는 2배정도 축적량을 증가시켰으며 0.2% catechol을 함께 첨가했을 때 균체내 Ge 축적량은 3.6배나 증가시킬 수 있었으며, 유기성 Ge인지 여부를 투석막을 통해서 24시간 dialysis 시켰을 때 투석막안에 75-80% 이상(분자량 10,000 dalton) 고분자의 유기성단백질들과 함께 남아있으므로 유기성 germanium인 것으로 판단했다.

Nobuhiro(1980)등은 게르마늄을 함유하는 효모의 생산가능성을 제시하였고, Slawson(1992)등과 Lee(1990)등은 게르마늄이 미생물에 대해 독성을 보이지만 미생물의 균체내에 energy independent passive binding 또는 energy dependent mechanism 모두에 의해서 축적될 수 있음을 발표하였다. 미생물 균체를 이용하는 연구는 SCP(single cell protein)용 효모를 중심으로 이루어졌고, 이 효모를 이용한 유기게르마늄 생산 가능성은 Van Dyke(1989) 등이 배양액의  $GeO_2$  농도가  $1.0\text{ mg mL}^{-1}$ 에 이르렀을 때 *Sacchromyces cerevisiae*의 생장이 온전히 저해됨과 미생물이 고농도  $GeO_2$ 에 적용할 수 있음을 보고하면서 시작되었다. Wei(1992)는 효모가 고농도의 무기게르마늄을 흡수할 수 있으며 효모균체 내에 축적된 게르마늄의 95%이상인 유기게르마늄으로 전환하는 능력이 있음을 보고하였다. 또한 게르마늄을 함유한 효모가 Kehlbeck(1983)등의 실험결과에서와 같이 항종양효과가 있을 뿐만 아니라, 동물의 건강에 유효하다는 것이 밝혀지면서 효모를 이용한 유기게르마늄의 생산은 점차 건강식품소재로 중요한 의미를 갖게 되었다. Kim(1995)등은  $GeO_2$  농도가  $80\text{ mg L}^{-1}$ 인 배지 (pH = 8.0)에 내성효모를 접종하여  $30^\circ\text{C}$ 에서 24시간동안 배양한 배양액을 세척, 분쇄, 원심분리하여 얻은 효모 세포벽과 핵, 미토콘드리아 등의 소기관 그리고 세포액 중에 포함되어 있는 게르마늄의 함량을 측

정한 결과, 대부분의 게르마늄이 효모세포벽에 결합되어 있는 것으로 보아 세포벽을 구성하는 고분자인  $\beta$ -glucan 등의 다당체나 혹은 세포벽과 세포막 사이에 존재하는 단백질에 결합된 것으로 추측된다. Jao(1990) 등은 천연유기게르마늄이 무기게르마늄 및 합성유기게르마늄보다 뛰어난 항암 효과를 보인다고 발표하였으며, 효모를 이용하여 유기게르마늄을 생합성하는 것이 가장 안전하고 효과적인 유기게르마늄 생산 방법이라고 하였다.

녹조류(Yanagimoto, M. 등, 1983) 및 규조류(Azam, F. 등, 1974)를 이용하여 무기게르마늄을 유기게르마늄화 하기도 하였다. Yanagimoto (Yanagimoto, M. 등, 1983)은 조류를 이용하였다. 조류는 알칼리 pH에서 잘 생육하므로 배지의 pH를 높임으로써 게르마늄의 흡수량을 증대시킬 수 있었다. 조류로서는 *Chlorella ellipsoideae*, *Oscillatoria sp.* 및 *Spirulina platensis*를 이용하여 게르마늄 농도별로 시험한 결과 *Oscillatoria sp.*가 *Chlorella ellipsoideae*보다 게르마늄에 민감하여 20 mg L<sup>-1</sup> 이상의 고농도에서 생육 저해를 받았다. *Spirulina platensis*의 경우 pH 12.3에서 배양시 cell내에 4.08 mg g<sup>-1</sup>의 게르마늄을 함유하였다.

식물체가 유기게르마늄의 효과적인 농축수단으로 이용되기도 하였으며, 그 때에 원소주기율표에서 같은 4A족에 속하며 Ge와 화학적 성질이 비슷한 Si가 함께 연구되었다. Si-H 결합과 Ge-H 결합 강도는 각각 63.0과 56.7 kcal mole<sup>-1</sup>로 비슷하고 (Glockling, F. 1969), Si와 Ge은 원자반경도 각각 0.134, 0.139 nm로 비슷하다 (Kada, T.H. 등, 1984). Si와 Ge은 크기도 비슷하기 때문에 생물학적 시스템에서 Si 대신에 Ge가 치환될 가능성이 있다고 하였다 (Davydov, V.L. 1966). Ge을 흡수하는 식물에 있어서 Si와 Ge의 유사성은 중요한 의미가 있다. Werner(1996)는 Ge는 Si의 흡수를 저해한다고 보고하였다. Ge-Si와 Ge-C 결합은 Si-Si와 Si-C 결합보다 약하기 때문에 세포벽의 정상적인 기능을 손상시키는데 황백화는 이러한 이유에 의해 일어난다고 하였으며, 황백화가 일어나는 부위에서 Ge의 축적이 많았다는 것과 일치한다고 하였다(Matsumoto, H., S. 등, 1975). 게르마늄은 식물체에서 음전하와 결합하는데 세포벽의 acidic residue는 Ge의 binding site로 작용하기도 한다. 6일된 보리 묘종에 20, 40, 60 및 80 $\mu$ M의 게르마늄을 7일동안 처리하여 축적량을 살펴본 결과 보리 뿌리와 줄기에 게르마늄이 축적되었으며 뿌리보다는 줄기에 축적량이 많았고, 게르마늄 농도의 증가에 비례하여 축적량도 증가하였다고 보고하였다(Halperin, S.J. 등, 1995). 게르마늄 40 $\mu$ M 이상에서는 잎이 황화되는 현상이 일어났다. 또 배지의 pH 수준을 4.5, 6.0, 7.5로 달리하였을 때 게르마늄 축적은 pH가 낮을수록 축적량은 높은 것으로 나타났다(Halperin, S.J. 등, 1995). 규소를 축적하는 식물인 벼와 규조류에 있어서 규소는 중요한 원소인데 규소의 이동을 연구하는데는 많은 어려움이 있었다. 벼에서의 게르마늄 연구는 처음 규소의 이동을 연구할 목적으로 사용되었다. <sup>31</sup>Si는 반감기가 2.62hr 밖에 되지 않지만 <sup>68</sup>Ge은 반감기가 282일로 길므로 주로 방사성 동위원소를 이용한 Si의 행동 구명시험에 주로 이용되었다. 벼 줄기의 게르마늄은 주로 단백질에서 이루어졌으며, 이는 단백질이 단순히 흡착하는 것이 아니라 특이한 흡착단백질이 있을것으로 추정하였다

(Matsumoto, H., S. 등, 1975). 식물에 Ge은 매우 독성이 있으며 벼의 경우 생육을 억제하고 황화현상을 일으킨다고 하였다(Dakley, W.M. 등, 1969; Lowry, O.H. 등, 1951). 규조류에 있어서는 Si의 대사를 방해하고, 규소를 필요로하는 증식기에 세포의 증식을 늦추는 결과를 나타내었다(Dakley, W.M. 등, 1969). Puerner(1990)는 보리, 밀, 오이 및 무우에 대해 게르마늄 농도별로  $\text{NaGeO}_3$ 를 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0mM처리하여 발아와 유묘의 생육을 살펴본 결과 게르마늄 처리농도가 높을수록 4종의 식물 모두 발아율이 떨어지고 유묘의 줄기 생장에 저해를 받았다고 하였다. 게르마늄을 필요로하는 식물인 보리는 게르마늄 처리후  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 의 공급으로 유묘의 생육저해가 완전히 해결되었고 엽의 황화현상도 감소하였으나, 밀 등의 다른 작물은 생육저해가 해결되지 않았다고 하였다. 식물체내에서 Si와 Ge의 행동이 비슷하다면 Ge은 Si 연구를 위한 유용한 도구가 될 수 있다. Datnoff(2001)등은 Si와 Ge은 식물체 흡수에 유사성이 있다고 보고하였으며 Table 5에서 보면 규소함량이 많은 작물이 게르마늄 함량도 높았다. 벼는 뿌리를 제거함으로 게르마늄 함량이 현저히 줄었지만 나팔꽃은 오히려 뿌리제거로 함량이 높았다. 이로써 식물의 게르마늄 흡수는 3가지 방식이 있는데 active한 벼와 passive한 완두콩, rejective한 나팔꽃이 있다. 벼에 게르마늄은 식물체 내부액에 함량이 높고 게르마늄 흡수는 DNP, 2, 4-D, NaCN, Si에 의해 저해를 받는다. 이는 식물체 뿌리가 게르마늄과 규소를 구분하지 못한다고 생각할 수 있고, 규소의 흡수 치환으로 게르마늄이 사용될 수도 있다는 것이다. 하지만 게르마늄 흡수는 식물체 앞에 갈색반점의 독성을 일으킨다.

Table 5-5. Si and Ge contents in various plants sand-cultured with nutrient solution containing  $50\text{mg L}^{-1}$  Si (as  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) and  $5\text{mg L}^{-1}$  Ge (as  $\text{H}_4\text{GeO}_4$ ) (Datnoff, L. E. 등, 2001).

Plant species	Si (%) <sup>a</sup>	Ge ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) <sup>a</sup>
Rice	6.61	3,140
Wheat	3.81	1,720
Maize	2.23	105
Kidney bean	1.24	860
Tomato	0.11	140
Morning glory	0.11	105

※ The plants were treated for 3 to 4 weeks

<sup>a</sup>Dry weight basis

Ma (2002)는 몇가지 작물을 규산  $47\text{mg L}^{-1}$  과 germanic acid  $1-10\text{mg L}^{-1}$ 을 함유하는 양액에서 재배하였을 때 모든 식물은 게르마늄 처리에 의해 생육 저해를 받았고 저해 정도는 벼



> 옥수수, 오이, 완두콩 > 토마토 > 나팔꽃 순이었다고 하였다. 벼의 경우 생육저해가 심했는데 벼 잎에 황색반점이 발생하였다. 게르마늄에 대한 저항성은 게르마늄과 규산 함유 능력과는 부의 관련이 있었다. 게르마늄의 흡수는 규소의 공급에 의하여 억제된다. 게르마늄의 독성은 벼(논) > 벼(밭) > 옥수수 > 완두콩 > 귀리 순이었다. 이러한 생육저해 정도는 게르마늄과 규소의 흡수능력과 관계가 있다. Ge-induced 저해는 모든 작물에서 규산첨가에 의해 경감되었지만 규산 흡수능력이 높은 식물에서 더욱 명백하였다. 게르마늄의 생리학적 효과는 규소와 다르지만 뿌리에 의한 게르마늄의 흡수는 규소와 비슷하다. Ge과 동일 족에 속하는 규소를 많이 흡수하는 벼는 Ge을 많이 흡수한다고 밝힌 바 있으며(高橋英一, 蕭聰明 三宅靖人. 1976), 또한 水耕栽培時 방사성<sup>68</sup>Ge을 이용하여 식물의 Ge 吸收에 대하여 검토한 결과, 벼의 줄기 밑부분의 자른 부위에서 채취한 분비액 중의 <sup>68</sup>Ge농도는 단시간에 外液의 수십 배에 달했다고 한다(高橋英一, 蕭聰明 三宅靖人. 1976b). 珪酸植物인 벼를 규소와 동족원소이면서 화학적 성질이 비슷한 Ge을 수경액에 넣어 砂耕栽培했을 때 식물체 내 Ge 함량은 현저히 높은 반면 Ca 함량은 현저히 낮았고 非珪酸植物인 토마토에서는 반대의 경향을 보였다고 한다(高橋英一, 蕭聰明 三宅靖人. 1976). Ge이 다량 함유된 식물체는 약학 및 의학 분야에서 관심이 많을 것 같아 그의 함량증대를 위해 水野卓(1988)은 유기 Ge 1,000 mg L<sup>-1</sup> 수용액에 상수리나무를 침지하고 가압 찌질하여 Ge을 흡수시킨 후 영지 버섯종균을 접종하여 재배 하였으며, 조직배양 및 포장을 통하여 실험한 바 있다(Kwon, T. O. 등, 1996; Namkoong, S. B. 1996). Ge을 많이 함유하고 있다고 알려진 명일엽(明日葉)과 인삼(人蔘)을 이용하여 기내배양을 통한 연구에서 명일엽 유래의 캘러스가 인삼 유래의 캘러스 보다 Ge을 많이 흡수하였다(韓昶烈 등, 1980). Ge 함량 증대를 위한 실험으로 포장에서 명일엽에 GeO<sub>2</sub>와 구연산 1 mM을 혼용 처리하면 GeO<sub>2</sub> 단독처리 구보다 Ge 흡수가 증가되었다. 또한 器內에서 명일엽과 동일 屬에 속하는 강활(羌活)은 GeO<sub>2</sub> 시용량 증가는 캘러스나 식물체중 Ge 함량을 증가시키거나 기타 무기성분 함량은 감소되는 경향이었고 구연산 0.1-1mM 시용으로 약간 증가되는 경향이였다(Park, B. W. 등, 1996). Lee(1995)등은 명일엽과 일당귀를 기내배양하여 게르마늄 흡수량 시험을 하였는데 식물 부위별 Ge함량 분석결과 명일엽은 일당귀에 비하여 전체적으로 약 2.1배 높았고 부위별로는 명일엽에서 엽병, 줄기, 잎의 순으로 함량이 많았다. 기내배양시 Ge 처리와 callus 증식과의 관련한 연구로는 고려인삼에서 MS배지에 GeO<sub>2</sub>을 첨가시 5 mg L<sup>-1</sup>까지는 callus 증식이 잘 되었으나 50, 100 mg L<sup>-1</sup>으로 농도가 증가할수록 저지되었다. Park(1996)등은 강활의 캘러스 및 식물체중 Ge 함량에 미치는 GeO<sub>2</sub>와 구연산의 영향을 구명하기 위하여 식물체 부위별로 캘러스를 유도하고 캘러스 증식시 GeO<sub>2</sub>와 구연산을 농도별로 처리하여 증식을 및 캘러스의 Ge 함량을 조사하였으며 강활을 pot에 재배하여 GeO<sub>2</sub>와 구연산을 농도별로 사용하여 식물체 중의 Ge 함량을 분석하였다. 동진벼를 이용한 Ge의 종류 및 농도에 따른 캘러스내 Ge 함량은 Ge 처리농도가 높을수록 증가되었는데, Ge 시용량이 100 mg L<sup>-1</sup> 이하에서는 무기게르마늄(GeO<sub>2</sub>) 처리가

유기게르마늄(Ge-132) 처리보다 켈러스내 Ge 함량이 높았으나, 그 이상의 농도에서는 유기게르마늄 처리가 무기게르마늄처리 보다 켈러스내 Ge 함량이 높았고 켈러스 활력도 좋았다고 하였다. 배지의 pH가 낮을수록 켈러스의 활력은 떨어지나 켈러스 내 Ge 함량은 높았으며, citric acid 와 *myo*-inositol 0.1-1.0 mM을 배지에 처리한 경우 무시용보다 켈러스 생육이나 켈러스 내 Ge 함량이 증가하였는데, citric acid 보다는 *myo*-inositol의 시용에서 더 증가되었다고 하였다(Kwon, T. O. 등, 1996).

게르마늄은 반도체산업의 재료, 독성 및 약리효과 측면에서 많이 연구가 수행되었지만 외국의 경우도 게르마늄의 농업적 측면에서 연구 결과는 많이 없는 편이다. 우리나라 경우 미생물을 이용한 유기게르마늄 연구와 작물에 대한 게르마늄 연구는 최근에 몇몇 연구자들을 통하여 기내배양을 중심으로 이루어졌으며, 농업적 측면에서의 연구는 많이 없는 실정이다.

## 2. 게르마늄관련 농자재의 문제점 분석

그동안 알려진 게르마늄 농산물 재배법은 게르마늄이 함유된 광물질을 미세하게 분쇄한 다음 그 분말을 식물이 자라는 토양 근권층에 공급하여 뿌리로부터 그 광물질에 함유된 게르마늄을 흡수하도록 하는 방법을 주로 사용하여 왔다. 또는 광물질을 물에 혼합하여 가열하거나 미생물 또는 기타 물질을 사용하여 게르마늄이 용출되도록 한 후 그 물을 관주 또는 엽면 살포하여 식물에 흡수되도록 하는 방법을 사용하여 왔다.

그러나 이러한 방법으로는 식물이 게르마늄을 충분히 흡수하지 못하여 최종 생산된 농산물 분석 결과 게르마늄이 함유되어 있지 않음이 다수 확인된 바 있다. 이러한 문제는 급속히 확대되고 있는 기능성 농산물 시장에 악영향을 끼침은 물론 소비자 불신이라는 큰 문제를 초래할 수 있으며, 현재 게르마늄 농법을 시도하고 있는 많은 농가에서는 이러한 잠재된 문제점을 인식조차 못하고 있는 실정이다.

본 연구개발 과정에서는 기존 게르마늄 농법의 문제점으로 지적되었던 식물 흡수 불가능 형태의 게르마늄 비료를 식물체가 흡수할 수 있는 새로운 형태의 게르마늄 비료로 개발하고자 하였으며, 그 동안의 자체 예비 실험 및 분석과정을 통해 게르마늄을 특별한 방법으로 액상화하여 일정한 처리프로그램에 의해 식물체에 공급하였을 때 최종 농산물에서 게르마늄 검출을 확인할 수 있었다.

한편, 작물에 공급하는 게르마늄 비료의 양과 농도에 따라 과소 공급시에는 최종 농산물에 게르마늄을 흡수, 전이시킬 수 없다는 문제가 있었으며, 과다 공급시에는 오히려 작물생육에 피해가 발생한다는 문제점이 제기되었다.

따라서, 작물에 공급하는 게르마늄 농자재의 적정 농도와 양에 대한 실험분석 과정과 연구자료가 반드시 필요하며, 특히 게르마늄 자체가 고가이어서 농업에 응용하기 위해서는 경제적 관점에서의 접근이 필요한 바, 식물에 공급된 게르마늄 비료의 소실을 최소화하며, 최종 농산

물에 충분히 흡수, 전이될 수 있도록 이행 촉진기술의 개발이 필요하다.

이와 같이 게르마늄 비료의 제조기술은 단순한 작물생육을 돕는 보조제로서의 비료가 아니라 농산물의 품질 자체를 차별화하는 기능성 비료로서 개발되어야 하며, 농업의 새로운 대안으로 떠오른 기능성 농산물 시장의 신뢰와 연관하여 기술의 필요성을 인식해야 할 것이다. 나아가 기능성 게르마늄 농산물 생산을 위한 특수 비료로 활용하여 식물을 통해 유기 게르마늄을 흡수할 수 있도록 보급하고, 특수 미네랄 성분과 접목하여 유기농법을 병행함으로써 기능성, 친환경 농산물 생산이 가능하도록 해야 할 것이다.

지금까지 국내외적으로 밝혀진 게르마늄에 대한 각종 보고서와 문헌을 보면 게르마늄은 항종양효과 외에도 돌연변이 활성 감소, natural killer 세포의 활성화를 포함한 면역 강화작용, 바이러스 감염 치료, 중금속 해독작용 등 다양한 약리작용이 보고되면서 생체의 기능 개선 측면에서 주목을 받고 있으나 이는 무기태가 아닌 유기형태 게르마늄의 기능이므로 게르마늄 비료를 사용하여 생산한 농산물의 안전성 평가 및 최종적으로 인체에 미치는 영향 등에 대한 자료 확보가 매우 중요한 실정이다.

게르마늄 존재가 밝혀진 이후 게르마늄에 대한 다각적인 연구가 진행되면서 식물체 내에 함유된 게르마늄에 대한 관심도 증대되었다. 산삼과 같은 약리 효과가 뛰어난 약용식물에서 게르마늄이 비교적 다량 함유되어 있음이 밝혀져 식물체 내에 존재하는 게르마늄은 그 자체만으로도 흥미의 대상이 되었다. 하지만 그 양이 워낙 미량인데다 활용성에 대한 회의적인 시각 때문에 아직도 식물과 게르마늄과의 관계에서는 분야별 많은 연구가 필요한 실정이다.

국내외에서 각 지역별, 종류별로 식물체 내의 게르마늄 함유량에 대한 많은 결과들이 있으나 분석기기, 분석시료, 분석부위, 분석방법 등과 같은 요인들과 동일 식물이라 하더라도 산지별 기후, 토양, 시비 등의 산지 조건과 채취 시기, 건조 방법 등의 영향으로 보고서마다 함유량에 대한 편차가 매우 크기 때문에 이러한 분석결과들이 사람들에게 많은 혼란과 불신을 불러일으키고 있다. 따라서 이에 대한 광범위하고도 세부적인 연구와 최신 분석기기를 이용한 다양하고도 정확한 정밀분석이 필요하다고 여겨진다.

1980년대 초부터 식물체에 함유된 게르마늄의 효능이 알려지면서 작물별 게르마늄 함량, 약효를 발휘할 수 있는 게르마늄 함량, 식물체에 함유된 유기 게르마늄 분리법, 식물체에 게르마늄을 다량 공급하는 법, 식물체 생육과 게르마늄과의 관계 등 다양한 주제들을 놓고 연구와 실험들이 진행되었으며, 세부적인 연구결과 발표와 특허출원이 경쟁적으로 이루어졌다.

또한, 식물체 내 게르마늄의 실용성에 대한 일부 회의적인 시각 때문에 연구들이 급진전되지는 못하였지만 게르마늄의 존재가치에 대한 특성 때문에 많은 연구들이 계속 진행되었다. 중국의 WTO 가입과 FTA 협상과 같은 국제적인 무역환경의 변화로 외국 농산물 수입이 불가피하게 되었고, 이로 인하여 절박한 상황에 처한 농촌현실 때문에 정부에서는 최근 몇 년 전부터 외국 농산물과의 경쟁에서 우위를 확보할 수 있는 고품질의 농산물을 생산하도록 많은 연구와

정책을 시행하였다. 이러한 시대적인 환경의 변화 때문에 게르마늄이 함유된 농산물, 즉 약리 효과를 낼 수 있는 기능성이 부가된 농산물이 관심을 받게 되었고, 게르마늄이 함유된 기능성 농산물 개발에 대한 연구도 지속적으로 진행되고 있다.

식물체 내에 함유된 게르마늄이 유기태인지 무기태인지에 대한 논란이 일부 있으나 대부분 유기 게르마늄으로 인정하고 있다. 식물체 내의 게르마늄이 설령 무기 게르마늄이라 할지라도 Hummentt, Keeser의 실험 결과 소량의 무기 게르마늄은 인체에 효능이 있다는 연구 결과를 토대로 한다면 식물체 내에 함유된 게르마늄은 극소량에 불과하기 때문에 다량 또는 장기간 섭취하더라도 인체에 무해하다고 할 수 있다. 국제 게르마늄 임상연구학회에는 순식물성 유기 게르마늄이 가장 안전하며, 함량이 낮을지라도 고 함량의 합성 유기 게르마늄보다 우수한 약리 작용이 있고 아무런 독성과 부작용이 없다고 발표하였다.

식물체 내에 흡수된 게르마늄은 Phyto-Germanium 형태로 존재하는데 부위별로 살펴보면 뿌리>잎>엽병 순으로 함유되어 있으며, 식물이 광합성 작용을 통해 그의 결과물로서 식물체 내에 게르마늄을 함유하고 있기 때문에 인체에 친화력이 있는 안전한 게르마늄이다. 1990년 대만 국립의료원의 자오(Jao) 박사 등은 천연 식물성 게르마늄이 다른 형태의 게르마늄보다 획기적인 항암 효능을 보인다는 사실을 오랜 실험과 연구로 입증하여 발표하였다. 많은 연구 결과들은 식물체 내로 흡수된 게르마늄을 유기 게르마늄으로 간주하고 있으며, 그것이 무기이든 유기이든 게르마늄 중 가장 약효가 뛰어난 것으로 인정하고 있다.

최근의 농산물 시장은 소비자의 경제적 여유와 맞물려 품질뿐만 아니라 농산물의 안전성, 기능성, 친환경 측면에 대한 요구가 증대하고 있다. 이러한 일련의 변화는 농산물의 특화 경향을 높이고 있다. 특화된 농산물은 기능성과 유기농산물의 두 가지로 개략적인 구분이 되고 향유 우리의 농업은 특화된 농산물의 시장점유율이 높아질 것으로 추정되고 있다(Rabobank : Food & Agribusiness Research 자료인용). 현대인들은 생활양식이나 식습관의 변화로 성인병과 암의 발생이 급격히 증가하고 있다. 이러한 질병 발생의 주요 원인중의 하나는 과도한 스트레스와 이를 방어하는 황산화물질의 불균형에 의한 것으로 알려져 있다. 이러한 질병을 예방하고자 다양한 식물로부터 약리 성분을 추출하여 건강 보조 또는 의약용으로 이용하거나 많이 섭취하는 농산물에 황산화력이 있는 기능성 물질을 강화하려는 시도가 점차 증가하고 있으며 그 효능에 대한 검정도 계속되고 있다 (Greenwald, 1998).

### 3. 시판 중인 게르마늄 함유 농자재의 수집, 분류 및 함량 분석

국내에서 시판되고 있는 게르마늄 함유 농자재는 크게 분말형태, 입제형태 및 액상의 3가지 형태로 나눌 수 있다. 분말형태는 게르마늄이 함유된 암석을 채취하여 분말 형태로 분쇄한 제품으로서 몇년전까지 가장 많이 사용되었으나 최근에는 무기게르마늄을 액상화한 형태의 게르마늄 함유 4종 복비가 시판되고 있으며, 광물질 분말상태의 비료보다 식물체 내로의 게르마늄

이온의 흡수 이행 정도가 대폭 개선되었고, 작물체에 사용하는 방법에 있어서도 편의성을 개선한 제품들이 일부 중소기업을 중심으로 개발되고 있는 실정이다.

일본의 경우 유기 게르마늄 합성기술이 발달되어 있으나 식물체에 응용하는 제품은 판매되지 않고 있으며, 광물질을 이용한 실험 사례는 다수 발견할 수 있다. 중국의 경우에도 자연 암반에서의 순수 게르마늄 추출 및 유기 게르마늄의 합성 기술은 발달되어 있으나 식물체에 응용하는 제품은 출시되지 않고 있다.

현재 국내 시판중인 여러 종류의 게르마늄 함유 농자재를 수집 분류하여 각 농자재의 특성 및 게르마늄 함량 등을 분석 조사하였다. 국내 게르마늄 관련 농자재는 크게 미세한 광물질 분말 형태, 액상화 형태, 입제 형태로 토양개량제 또는 4종 복비의 형태로 판매되고 있으며, 최근에는 액상형태의 제품이 많이 개발 판매되고 있다. 국내 주요 게르마늄 농자재 제조회사는 (주)한구게르마늄, (주)대유, (주)대덕바이오, (주)캐러스, (주)파이어스, (주)K&C바이오 등과 수만은 수십개의 벤처기업들이 있다. 이들 업체에서 개발 판매되고 있는 주요 게르마늄 농자재 수십종을 수집하여 게르마늄 함량을 분석한 결과 제품 종류에 따라 다양하게 함유되어 있었으며, 광물질 분말형태 제품의 경우 게르마늄의 함량은 전체적으로 1-5ppm 범위로 함유되어 있었고, 액상 형태 제품은 약 500-5,000ppm, 입제 형태의 제품에서는 100-300ppm 정도의 게르마늄 함량을 확인할 수 있었다. 현재 판매되고 있는 이러한 제품들은 식물체 사용기준이 명확하게 정립되어 있지 않으며 사용기준을 정하기 위한 실제적인 시험도 전혀 이루어지지 않은 상태로 판매되고 있다.

## II. 용해교반기를 이용한 액상 게르마늄 시제품의 개발

### 1. 게르마늄 ( $\text{GeO}_2$ )의 용해 실험

무기 게르마늄의 액상화는 적절한 용매 및 특정 조건하에서 순수 게르마늄을 용해시킴으로써 이루어질 수 있다. 용매는 물 또는 알칼리 수용액을 사용하는 것이 좋으며, 질산, 염산 등의 사용은 피하는 것이 좋다. 알칼리 용액을 사용하는 경우에는 강알칼리 수용액이 바람직하며, 그 예로써 수산화나트륨 ( $\text{NaOH}$ ), 수산화칼륨 ( $\text{KOH}$ ), 탄산나트륨 ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), 탄산칼륨 ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) 등의 강알칼리 수용액 또는 이들의 혼합 용액을 사용한다. 특히, 탄산칼륨 수용액과 수산화칼륨 수용액의 혼합 용액을 사용하는 것이 효과적이었다.

본 실험에서 게르마늄 용해액으로 사용되었던 용매는 증류수를 사용하거나 또는 증류수와 수산화칼륨을 약 1:0.5의 부피비로 혼합한 것, 또는 증류수와 탄산칼륨을 약 1:0.5의 부피비로 혼합한 것을 단독으로 또는 혼합하여 사용하였으며, 상기 알칼리액을 혼합하여 사용하는 경우에는 각각의 알칼리수 원액을 2:1의 비율로 사용하는 것이 효과적이었다. 게르마늄과 용매의 혼합비는 중량을 기준으로 용매와 순수게르마늄( $\text{GeO}_2$ )의 비율에서 게르마늄의 함량이 낮을수록 바람직하였으며, 일반적으로 100:0.1-10의 비율로 혼합하였을 때 용해도가 높았으며, 100:1의 비율에서 가장 경제적이었다.

게르마늄 용해에 있어서 온도 조건은 매우 민감하였으며 용해과정은 35-120°C 중에서도 90-98°C의 온도에서 수행하는 것이 효과적이었으며, 특히 95°C의 온도에서 최적의 결과를 나타냈다.

적절히 배합된 혼합액은 용해시간 30분-24시간 중에서 3시간 교반 하에 숙성시킴으로써 게르마늄 용해액을 충분히 얻을 수 있었다.

Table 5-6, 5-7, 5-8, 5-9는 용해 온도 및 시간에 따른  $\text{GeO}_2$ (99.999%)의 용해율을 용매인  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}+\text{KOH}$ ,  $\text{H}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}+\text{K}_2\text{CO}_3$ 에 따라 각각 나타낸 결과이며, Fig. 5-2는 분말 상태의 무기 게르마늄( $\text{GeO}_2$ , 99.999%)을 100% 용해한 상태이다.

Table 5-6. 용해 온도 및 시간에 따른 증류수(H<sub>2</sub>O)에서의 GeO<sub>2</sub> 용해율

GeO <sub>2</sub> 순도	용 매	용해 온도 (°C)	용해 시간 (시:분)	GeO <sub>2</sub> 용해율(%)
99.999%	H <sub>2</sub> O	35-40	6:00	17.3±1.8
		40-45	5:30	22.5±1.2
		45-50	5:30	29.4±0.6
		50-55	5:00	36.1±2.5
		55-60	5:00	42.9±2.2
		60-65	4:30	45.8±1.2
		65-70	4:30	48.3±3.0
		70-75	4:00	52.4±1.7
		75-80	4:00	57.9±0.9
		80-85	3:30	64.2±4.2
		85-90	3:30	69.0±3.2
		90-95	3:00	75.2±2.2
		95-100	3:00	91.1±2.3

Table 5-7. 용해 온도 및 시간에 따른 H<sub>2</sub>O+KOH 용매에서의 GeO<sub>2</sub> 용해율

GeO <sub>2</sub> 순도	용 매	용해 온도 (°C)	용해 시간 (시:분)	GeO <sub>2</sub> 용해율(%)
99.999%	H <sub>2</sub> O + KOH	35-40	6:00	27.5±3.7
		40-45	5:30	44.5±3.2
		45-50	5:30	51.2±1.2
		50-55	5:00	59.6±1.9
		55-60	5:00	65.0±0.9
		60-65	4:30	72.1±2.2
		65-70	4:30	76.2±3.9
		70-75	4:00	81.3±1.3
		75-80	4:00	87.5±2.0
		80-85	3:30	92.8±0.8
		85-90	3:30	98.8±0.2
		90-95	3:00	100±0.1
		95-100	3:00	100±0.0

Table 5-8. 용해 온도 및 시간에 따른 H<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 용매에서의 GeO<sub>2</sub> 용해율

GeO <sub>2</sub> 순도	용 매	용해 온도 (°C)	용해 시간 (시:분)	GeO <sub>2</sub> 용해율(%)
99.999%	H <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	35-40	6:00	24.4±4.6
		40-45	5:30	40.5±3.2
		45-50	5:30	48.2±1.8
		50-55	5:00	54.2±1.9
		55-60	5:00	63.3±3.3
		60-65	4:30	69.2±1.2
		65-70	4:30	75.8±1.9
		70-75	4:00	80.2±2.3
		75-80	4:00	86.7±0.9
		80-85	3:30	93.3±1.1
		85-90	3:30	96.4±0.6
		90-95	3:00	100±0.2
95-100	3:00	100±0.1		

Table 5-9. 용해 온도 및 시간에 따른 H<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 용매에서의 GeO<sub>2</sub> 용해율

GeO <sub>2</sub> 순도	용 매	용해 온도 (°C)	용해 시간 (시:분)	GeO <sub>2</sub> 용해율(%)
99.999%	H <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	35-40	6:00	34.1±3.4
		40-45	5:30	46.2±2.8
		45-50	5:30	55.9±2.6
		50-55	5:00	58.5±2.2
		55-60	5:00	68.5±1.8
		60-65	4:30	73.3±2.3
		65-70	4:30	80.3±1.9
		70-75	4:00	84.7±0.8
		75-80	4:00	89.1±1.2
		80-85	3:30	94.2±1.3
		85-90	3:30	99.1±0.4
		90-95	3:00	100±0.2
95-100	3:00	100±0.0		



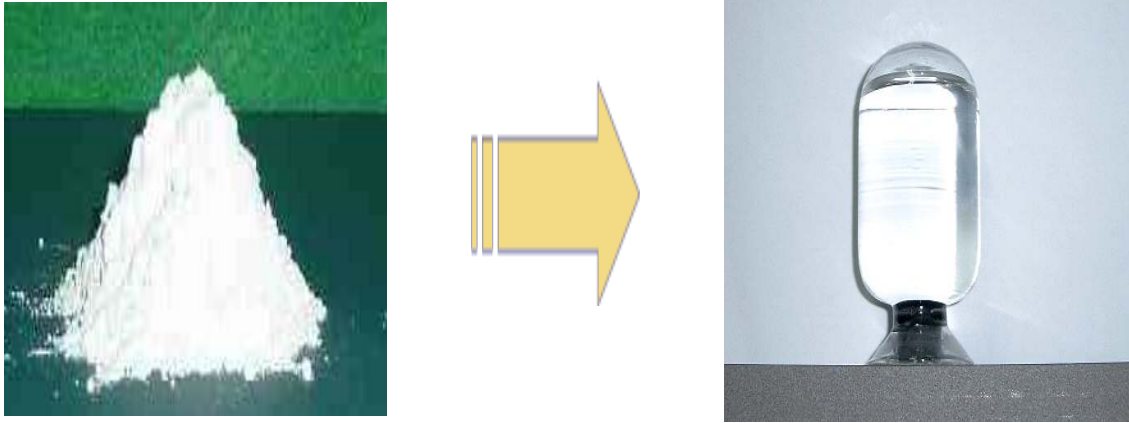


Fig. 5-2. GeO<sub>2</sub>(99.999%)의 용해 상태

Fig. 5-3과 Fig. 5-4는 GeO<sub>2</sub>(99.999%)의 본 연구에 사용한 용해교반기와 그 설계도를 나타낸 것이다.



Fig. 5-3. GeO<sub>2</sub>(99.999%)의 용해 교반기

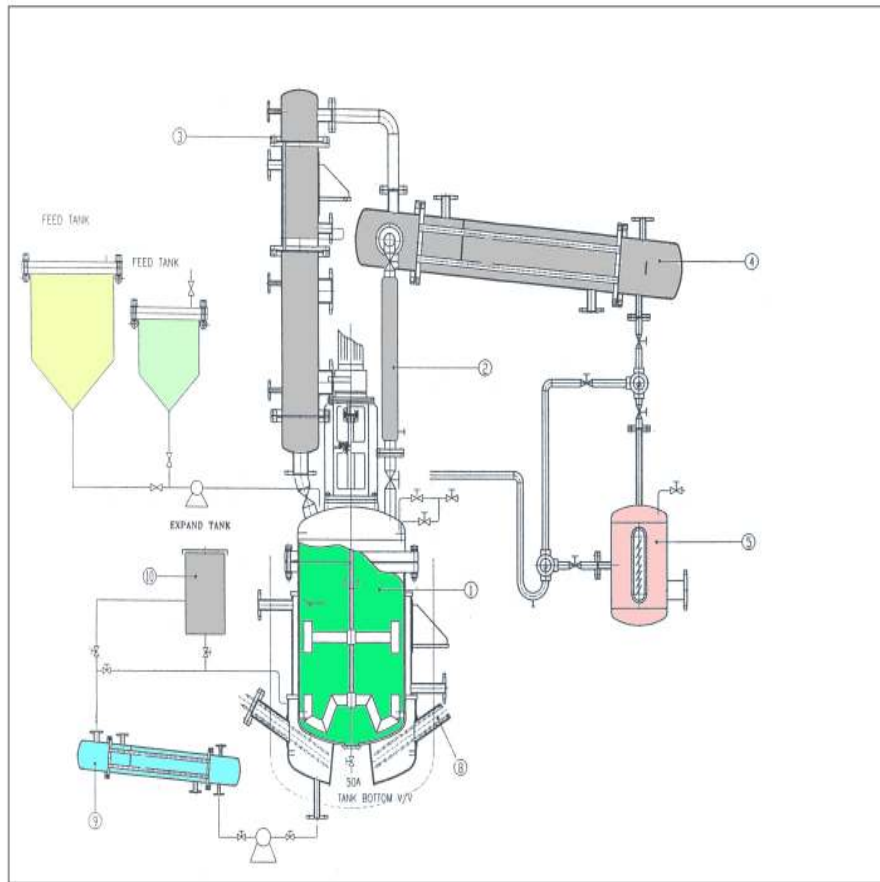


Fig. 5-4. 용해 교반기 설계도

- ① 혼합 교반 및 반응기, ② GeO<sub>2</sub> 투입기, ③ 미네랄 투입기, ④ 반응기, ⑤ 가수분해 장치,  
 ⑥ 보증성분 투입기(1), ⑦ 보증성분 투입기(2), ⑧ 가열기, ⑨ 압축기, ⑩ 센서

## 2. 게르마늄 제제 (액상)의 안정화 실험

본 실험에서는 식물 흡수가 가능한 형태의 액상 무기 게르마늄(게르마늄 용액)을 작물의 재배과정에 처리하여 식물이 흡수하도록 하고, 흡수 전이된 게르마늄이 탄소동화작용에 의해 식물성 유기게르마늄 (phyto-germanium)의 형태로 식물체 내에 존재하도록 함으로써 안전하고 효율적인 방법으로 식물성 유기게르마늄이 농산물에 함유될 수 있도록 시험 제조된 액상 게르마늄 제제가 외부의 어떠한 환경에도 변화되지 않는 안정성을 확보한 형태의 제형으로 변화시키고자 하였다.

무기 게르마늄은 용해가 되었다 하더라도 주변의 조건에 따라서, 예를 들면 실온에서도 결정화가 일어날 가능성이 있기 때문에 이를 안정화시켜야 한다. 즉, 증류수를 사용하여 용해를 시키더라도 저온에서는 90%까지 결정화가 되어버리므로 게르마늄 용해액을 포장에 적용하는 데에는 문제가 발생한다. 따라서 무기 게르마늄을 온도나 수분에 대해 안정화시키기 위해서는 게르마늄 용해액의 pH를 7.0-7.5 범위로 조정해주는 것이 좋았다.

안정화제제로는 차아인산나트륨 또는 수산화나트륨을 게르마늄의 양을 기준으로 약 1:0.5-2의 비율로 첨가할 수 있었으며, 게르마늄의 양과 비슷하게 맞춰 첨가하는 것이 최적의 안정화 효과를 얻을 수 있었다. 차아인산나트륨 대신에 동일한 기능성을 갖는 안정화제를 사용하여도 무방하였다.

Fig. 5-5는 용해된  $GeO_2$ 가 다시 결정화되어 가는 상태를 나타낸 것이며, Fig. 5-6은 안정화제를 사용하여 결정화를 방지한 액상 게르마늄의 상태를 나타내고 있다.



Fig. 5-5. 결정화 상태

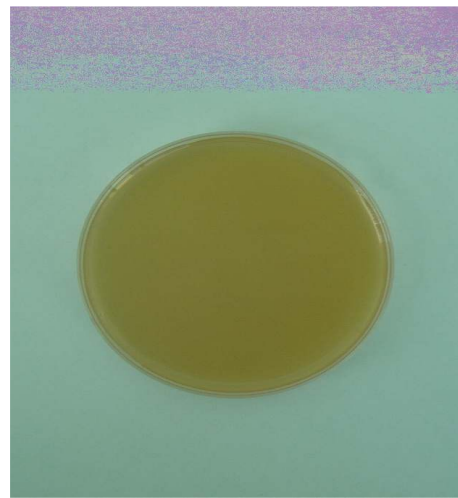


Fig. 5-6. 안정화 상태

### 3. 제형별 시제품 개발

게르마늄 용해액은 비료의 공급 형태가 액상일 경우에 고령화된 농가에서 실제 제품 사용에 어려움이 많을 것으로 예상되는 바, 액상 이외에도 작물에 따라 사용이 편리하도록 제형을 입제 형태로 변경, 개발하였다.

우선 토양개량 효과가 뛰어난 소성 폐화석이나 미세하게 분쇄된 광물질과 혼합하여 고품의 입제 형태로 제조하였으며, 토양에 처리하였을 경우 물에 용해되기 쉬운 상태로 되어 있기 때문에 토양개량 효과는 물론 게르마늄이 함유된 기능성 농산물을 얻을 수 있다. 또한 친환경자재만을 사용함으로써 우리나라 농업의 중점 추진방향 중 하나인 친환경농업 실천에 있어서도 널리 보급할 만한 재료로 구성되었다.

Fig. 5-7은 본 연구개발과정에서의 실험결과에 근거, 각각 1L와 5L 플라스틱 용기를 이용하여 액상화한 게르마늄 비료의 시제품을 나타낸 것으로써 온도를 비롯한 제반 환경의 변화에도 결정화되지 않는 안정된 상태를 지속적으로 유지함으로써 농업현장에 공급하여 실용화하여도 문제가 없음이 확인되었다.

Fig. 5-8은 소성 폐화석과 분말상태의 광물질에 액상화한 게르마늄 비료를 첨가하여 고품의

입제 형태로 제조한 시제품을 나타낸 것으로써 입자 크기별 또는 혼합 자재의 종류에 따라 다양한 형태와 기능을 가진 제품 생산이 가능함을 확인하였다.

현재 식물체의 게르마늄 흡수이용효율을 높이기 위한 여러 가지 방안을 검토 중에 있으며 그 한가지 방안으로 게르마늄을 나노화 시키는 방법을 찾았으며 몇가지 기초 실험에서 기존의 단순한 용해방법에 비하여 식물체 흡수효율이 매우 높아지는 것을 확인하였다. 현재 이 기술은 (주)NANO PLEX와 공동 연구중에 있다.



Fig. 3-7. 액상 게르마늄 비료의 시제품



Fig. 5-8. 입상 게르마늄 비료의 시제품

#### 4. 연구결과 요약

경제적이고 식물체 흡수이용효율이 높은 게르마늄 함유 친환경 농자재를 개발하기 위하여 고효율의 게르마늄 용해방법을 정립하고 용액 내 게르마늄의 안정화 방안 검토하여 게르마늄 농자재 제형별 시제품을 제조하였다.

일반적으로 게르마늄 농자재의 원료로 사용하고 있는  $GeO_2$ 는 물에 대한 용해도가 매우 낮으므로 이를 효율적이고 경제적인 용해기술 확보가 매우 중요하다. 본 실험에서는 최적의 용매를

선별하기 위하여 여러 종류의 산과 알칼리 종류, 물 등을 용매로 하여  $\text{GeO}_2$  용해도를 검토하였으며 알칼리액을 혼합하여 사용하는 경우에는 각각의 알칼리수 원액을 2:1의 비율로 사용하는 것이 효과적이었다. 게르마늄과 용매의 혼합비는 중량을 기준으로 용매와 순수게르마늄( $\text{GeO}_2$ )의 비율에서 게르마늄의 함량이 낮을수록 바람직하였으며, 일반적으로 100:0.1-10의 비율로 혼합하였을 때 용해도가 높았으며, 100:1의 비율에서 가장 경제적이었다. 게르마늄 용해에 있어서 온도 조건은 매우 민감하였으며 용해과정은 35-120°C 중에서도 90-98°C의 온도에서 수행하는 것이 효과적이었으며, 특히 95°C의 온도에서 최적의 결과를 나타냈다. 적절히 배합된 혼합액은 용해시간 30분-24시간 중에서 3시간 교반 하에 숙성시킴으로써 게르마늄 용해액을 충분히 얻을 수 있었다.

무기 게르마늄은 용해가 되었다 하더라도 주변의 조건에 따라서 결정화가 일어날 가능성이 있기 때문에 이를 안정화시킬 수 있는 방안을 검토하였다. 무기 게르마늄을 온도나 수분에 대해 안정화시키기 위해서는 게르마늄 용해액의 pH를 7.0-7.5 범위로 조정해주는 것이 효과가 우수하였으며, 안정화제제로는 차아인산나트륨 또는 수산화나트륨을 게르마늄의 양을 기준으로 약 1:0.5-2의 비율로 첨가할 수 있었으며, 게르마늄의 양과 비슷하게 맞춰 첨가하는 것이 최적의 안정화 효과를 얻을 수 있었다.

상기의 연구결과들을 토대로 온도를 비롯한 제반 환경의 변화에도 결정화되지 않는 안정된 상태를 지속적으로 유지하는 액상형태의 게르마늄 비료의 시제품을 제조하였으며, 소성 폐화석과 분말상태의 광물질에 액상화한 게르마늄 비료를 첨가하여 고형의 입체 형태로 제조한 시제품을 제조하였다.

현재 식물체의 게르마늄 흡수이용효율을 높이기 위한 여러 가지 방안을 검토 중에 있으며 그 한가지 방안으로 게르마늄을 나노화 시키는 방법을 찾았으며 몇가지 기초 실험에서 기존의 단순한 용해방법에 비하여 식물체 흡수효율이 매우 높아지는 것을 확인하였다. 현재 이 기술은 (주)NANO PLEX와 공동 연구중에 있다.



## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

게르마늄함유 친환경 농자재 및 기능성 농산물 생산기술 개발을 위해 1차년도에는 시중에 유통되고 있는 게르마늄 농산물의 게르마늄 함량 조사와 게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술 개발 및 게르마늄함유 기능성 채소(상추) 수경재배 기술 개발을 위한 농산물의 생육특성, 게르마늄 독성범위 등 기초연구를 수행하였고, 게르마늄함유 기능성 농산물 재배에 필요한 농자재 확보를 위해 게르마늄함유 친환경 농자재 제조기술을 개발하였다. 또한 본 연구의 체계적인 기술 개발을 위해 식물체내 게르마늄 분석 및 시료전처리 최적화 방안을 검토하였다. 2차년도에는 게르마늄함유 기능성 쌀 생산기술 개발의 기초연구를 토대로 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배법을 개발하였고, 게르마늄함유 기능성 채소(오이) 수경재배 기술 개발하였다. 또한 게르마늄 함유 기능성 농산물의 동물실험을 통한 안전성 및 면역조절효과를 검토하였다.

3차년도에는 1-2차년도의 연구에서 개발한 친환경 농자재 및 기능성 농산물 생산기술을 실용화하기 위해 개발된 게르마늄 농자재 효과검정 및 기능성 쌀 및 채소 생산기술을 실용화하였고, 보다 안정적인 기능성농산물 생산을 위해 게르마늄 함유 기능성 농산물의 동물실험을 통한 항암효과를 검토하였다. 또한 3년 동안의 연구결과를 토대로 게르마늄함유 쌀 재배 매뉴얼을 제시하였다.

현재 5개 영농법인과 기술이전을 협약하여 게르마늄함유 기능성 농산물 생산과 브랜드화를 위한 프로그램을 진행 및 지도하고 있다. 다수의 농가에 게르마늄 농자재 제조회사에 기술지도를 실시하였으며, 농작물내 게르마늄 함량 분석은 수시로 지원하고 있다.





## 제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

### 제 1 절 연구개발 성과

#### 1. 논문게재

게재 연도	논문명	교신저자	학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분	SCI 구분
2007	채소종자 발아와 육묘생장에 미치는 유기 또는 무기게르마늄의 효과 및 흡수특성	조주식	한국환경농학회지	26 (3)	국내	
2008	게르마늄 토양처리시 토성이 벼의 생육 및 게르마늄 흡수에 미치는 영향	허중수	한국환경농학회지	27 (3)	국내	
2008	게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 품종 및 게르마늄 시비 방법 선정	허중수	한국환경농학회지	27 (4)	국내	
2009	게르마늄을 함유한 상추의 단일 경구투여 독성 검사	이성태	한국환경농학회지	28 (1)	국내	
	Differential Effect of GeO <sub>2</sub> and Ge-132 on Lettuce Plant Growth and Its Uptake Properties	조주식	JKSABC	심사중		SCIE
	Differential regulation of GeO <sub>2</sub> and Ge-132 on cucumber growth and its accumulation properties	조주식	Journal of Plant Nutrition and Soil Science	심사중		SCI

#### 2. 학술회의 논문발표

발표 연도	논문명	교신저자	학술회의명	발표일	장소
2007	Rice Cultivation Technology for Production of Functional Rice with Germanium in Soil	허중수	동남아시아토양학회	2007. 10	일본
2007	Development of Rice Cultivation Technology Using Foliar Sprays of Germanium Solution for Production of Functional Rice with Germanium	조주식	동남아시아토양학회	2007. 10	일본
2007	Effect of germanium (Ge) on plant growth and characteristics of Ge accumulation from lettuce	조주식	동남아시아토양학회	2007. 10	일본
2008	Plant growth, germanium accumulation and distribution pattern under various Ge-132 and GeO <sub>2</sub> treatment from cucumber	조주식	미국토양화학회	2008. 10	미국
2008	Characterization of lettuce plant growth and germanium accumulation under various Ge-132 and GeO <sub>2</sub> treatment	조주식	미국토양화학회	2008. 10	미국

발표연도	논문명	교신저자	학술회의명	발표일	장소
2008	Effect of rice cultivation on rice cultivars for production of functional rice with germanium in Korea	허종수	미국토양화학회	2008. 10	미국
2008	Production of functional rice with germanium under different soil texture in soil application	허종수	미국토양화학회	2008. 10	미국
2006	상추와 청경채 생육에 대한 게르마늄의 영향 및 흡수특성	조주식	한국토양비료학회	2006. 10	한국
2006	수경재배 상추에 대한 게르마늄(Ge)의 영향 및 흡수특성	조주식	한국토양비료학회	2006. 10	한국
2007	Uptake and effect of Germanium(Ge) on seed germination and plant growth in Chinese Cabbage and in Leaf Mustard	조주식	한국응용생명화학회 국제심포지움	2006. 10	한국
2007	Effect of various pH with germanium solution on seed germination and growth of Lettuce	조주식	한국응용생명화학회	2007. 4	한국
2007	Effect of various GeO <sub>2</sub> and Ge-132 concentrations on seed germination and growth of Lettuce	조주식	한국응용생명화학회	2007. 4	한국
2007	Effect Of germanium(Ge) Early growth and uptake from Lettuce seedling	조주식	한국토양비료학회	2007. 5	한국
2007	Development of rice cultivation technology in soil for production of functional rice with germanium	허종수	한국토양비료학회	2007. 5	한국
2007	Investigation of germanium absorption under different foliar sprays of germanium solution for production of functional rice with germanium	허종수	한국토양비료학회	2007. 5	한국
2007	Effect of germanium(Ge) on growth and uptake from hydroponically-grown	조주식	한국토양비료학회	2007. 5	한국
2007	Growth characteristics and Ge uptake with germanium treatments on hydroponically-grown Lettuce	조주식	한국환경농학회	2007. 7	한국
2007	Characteristics of Ge accumulation and lettuce growth with treatment of organic or inorganic germanium	조주식	한국응용생명화학회	2007. 10	한국

발표연도	논문명	교신저자	학술회의명	발표일	장소
2008	유기 또는 무기 게르마늄 처리가 상추생육에 미치는 영향과 Ge 흡수 특성 분석	조주식	한국토양비료학회	2008. 5	한국
2008	유기 또는 무기 게르마늄 처리가 오이생육에 미치는 영향과 Ge 축적 및 분포 특성 조사	조주식	한국토양비료학회	2008. 5	한국
2008	게르마늄 함유 기능성 농산물 생산기술 개발	허중수	한국환경농학회	2008. 7	한국
2008	Characterization of Ge uptake and lettuce growth with inorganic or organic germanium treatments	조주식	한국환경농학회	2008. 7	한국
2008	Characterization of cucumber growth with Ge-132 and GeO2 treatment and its accumulation and distribution in plants	조주식	한국환경농학회	2008. 7	한국
2008	게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 품종 선정	허중수	한국환경농학회	2008. 7	한국
2008	게르마늄 함유 기능성 쌀 생산을 위한 최적 토성 선정	허중수	한국환경농학회	2008. 7	한국

### 3. 특허 성과

- 게르마늄 액상 비료 제조기술은 현재 특허 출원 준비 중에 있으며 나노화된 게르마늄 액상 비료 제조기술은 작물시험 후 특허 출원 예정임.

### 4. 기술료 징수 현황

- 본 연구과제의 연구성과물은 게르마늄 함유 기능성 농산물을 생산하기 위한 재배기술과 관련된 것이므로 기업체를 통한 사업화 보다는 영농법인이나 농민단체에 무상기술이전을 하였음.
- 현재 5개의 영농법인에 무상기술이전을 하고 기술지도 중에 있음
  - 기술이전 영농법인 : 5개소 (광양가남매실농원영농조합법인, 새싹유기영농조합법인, 생기들넉영농조합법인, 신금친환경쌀영농조합법인, 영농회사법인 농자천(유))

### 5. 사업화 현황

해당사항 없음.

6. 인력활용/양성 성과

(1) 인력지원 성과

지원 총인원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타지역
12	1	5	6	-	8	4	-	-	12

(2) 장·단기 연수지원 성과

해당사항 없음.

(3) 산업기술인력 양성 성과

해당사항 없음.

7. 경제사회 파급효과

산업지원 성과 (단위 : 건)				고용창출 성과 (단위 : 명)		
기술지도	기술이전	기술평가	합계	창업	사업체 확장	합계
27	5		31			

○ 현재 5개의 영농법인에 기술이전을 하고 기술지도 중에 있음

- 기술이전 영농법인 : 5개소 (광양가남매실농원영농조합법인, 새싹유기영농조합법인, 생기들녘영농조합법인, 신금친환경쌀영농조합법인, 영농회사법인 농자천(유))

○ 게르마늄 농작물 재배 농가지도 : 7농가

- 전남, 경남지역의 농민과 지역 농업기술센터들로 부터 게르마늄 농작물 재배와 관련한 문의가 많이 오고 있으며 게르마늄에 대한 올바른 이해와 농작물재배관련 방법 등을 지도하고 있음.

○ 게르마늄 농작물 게르마늄 분석지원 : 20농가

- 농민들의 가장 큰 애로사항중의 하나였던 게르마늄 농자재 재배 농작물의 정확한 게르마늄 함량 분석에 대한 지원을 하고 있음.

○ 게르마늄 농자재 제조업체의 애로사항 지원 : 4개업체

- 주요 게르마늄 농자재 제조업체와의 간담회를 통해 회사의 애로사항 해결 방안을 지원하고 고품질

의 기능성 농자재 개발과 농민들에 대한 게르마늄 농자재의 정확한 사용방법 등을 지도할 수 있는 방안 등을 주기적으로 의논하고 있음.

## 제 2 절 연구 성과활용 계획

### 1. 기대효과

#### 가. 기술적 측면

- 게르마늄의 식물체 흡수 전이가 쉬운 게르마늄 농자재 개발을 위한 기술력 확보
- 게르마늄함유 친환경 농자재 및 기능성농산물 생산기술 개발에 의한 토양중 게르마늄 잔류량 감소
- 작물별 게르마늄 적정 처리농도를 구명에 의한 기능적이면서 안전한 농산물 생산기술 정립
- 농산물내 정확한 게르마늄 분석을 시료전처리 방법과 분석기술 정립
- 게르마늄함유 기능성 농산물 생산을 위한 작부체계 확립 및 매뉴얼 작성
- 유기게르마늄함유 농산물의 동물실험을 통한 약리효과 구명

#### 나. 경제·산업적 측면

- 게르마늄 흡수 이용효율이 높은 게르마늄 농자재 개발 기술확보에 의한 기능성 식품 수요 창출
- 게르마늄함유 기능성 농산물을 브랜드화하여 농가소득 향상
- 게르마늄 흡수량 증대를 위한 재배기술 개발로 인해 게르마늄 농자재 구입에 대한 경영비 절감.

### 2. 활용방안

- 게르마늄함유 농산물 및 농자재 중 게르마늄 함량 분석의 문제점 개선
- 농작물내 미량 게르마늄 분석기술 체계 정립
- 작물체내 흡수 전이가 우수한 게르마늄 농자재를 개발함으로써 게르마늄 자재 효율성 증대
- 작물별 적정 게르마늄 사용방법에 따른 유기게르마늄함유 농산물 재배기술의 농가 보급
- 게르마늄함유 기능성 농산물 생산을 위한 작부체계 확립 및 매뉴얼 작성에 활용
- 게르마늄함유 농산물의 동물실험을 통한 안전성 및 기능성 검정으로 국민보건 향상

### 3. 추가연구의 필요성

본 연구는 식물체내 흡수전이가 우수한 게르마늄함유 친환경 농자재를 개발하고, 이를 바탕으로 게르마늄함유 기능성 쌀 생산 기술을 개발하고, 게르마늄함유 기능성 채소 수경재배기술을 개발하며, 게르마늄함유 기능성 채소의 안전성 및 약리효과를 검증하고자 하였고, 최종적으로는 게르마늄함유 농산물의 기능성을 검증하여 브랜드화하고 농가소득을 향상 시키고자 하였다. 하지만 현재 수행된 연구 결과만으로 이들 개발기술을 현장에 적용하는 것은 현장 적용성 측면에서 한계가 있을 것으로 판단된다. 특히 벼의 경우 본 연구에서 4품종의 벼에서 게르마늄 흡수 특성을 조사하였으나, 연구결과 품종별로 게르마늄 독성 범위가 달라 향후 다양한 품종에서 게르마늄 독성 범위 및 재배기술을 적용하여 최적 조건을 조사하는 연구가 추진되어야 할 것으로 판단된다. 또한 기능성 채소의 경우도 벼와 마찬가지로 3종류의 채소에만 국한된 게르마늄함유 기능성 채소 수경재배기술이므로 향후 추가연구를 통해 다양한 채소류에 적용하여 그 활용성과 적용성의 범위를 넓힐 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구는 실제 벼 재배 농가에 게르마늄함유 기능성 농산물 생산 기술을 실용화하여 보급하기 위한 목적으로 연구되어 적용성면에서는 매우 높은 가치를 가지나, 실제 게르마늄의 식물체내 흡수전이 기작, 게르마늄함유 농산물의 안정성 및 약리효과 측면에서 추가적인 세부연구가 필요할 것이다.

### 4. 타연구에의 활용계획

본 연구는 게르마늄함유 기능성 농산물 생산기술을 개발하기 위해 곡류 중에서 벼, 엽채류 중에서 상추, 오이, 갖에 게르마늄을 시용하여 기능성 농산물 재배기술을 개발하였다. 하지만 현재 게르마늄은 다양한 곡류, 엽채류 및 과채류에 적용되고 있어 본 연구진의 기술인력과 노하우를 이용하여 다양한 농산물에 적용할 계획이다.

또한 본 연구에서 개발한 게르마늄 액상비료는 기존의 제품들에 비하여 비교적 식물흡수효율이 양호하지만 식물체내 전이 효율을 더 높여야 할 필요가 있다. 그래서 현재 게르마늄을 나노입자 형태로 전환하여 제조하는 방법을 추진중에 있다.

### 5. 실용화, 산업화 계획

본 연구는 실제 벼 재배 농가에 게르마늄함유 기능성 농산물 생산 기술을 실용화하여 보급하기 위한 목적으로 연구되었기 때문에 개발된 재배기술을 무료로 농가에 실용화하여 보급할 계획이다. 실제 현재 5개의 영농조합법인에 기술이전협약을 하여 게르마늄 함유 매실, 쌀, 새싹채소, 토마토 등을 생산하여 브랜드화하는 프로그램을 진행하고 있다.

### 6. 교육, 지도, 홍보 등 기술확산 계획

본 연구는 5개의 영농조합법인에 기술이전협약을 하여 게르마늄 함유 매실, 쌀, 새싹채소, 토마토

등을 생산하여 브랜드화하는 프로그램을 진행하고 있다. 또한 연구수행중에 이미 7건의 게르마늄 농작물 재배를 위해 농가를 지도하였고, 이후에도 전남, 경남지역의 농민과 지역 농업기술센터들로 부터 게르마늄 농작물 재배와 관련한 문의가 많이 오고 있으며 게르마늄에 대한 올바른 이해와 농작물재배관련 방법 등을 꾸준히 지도할 계획이다. 또한 게르마늄 농작물 중 게르마늄 분석을 문의한 20농가 18농산물에 대해 기술지원을 실시하였다. 특히 게르마늄 분석은 개발된 기술의 보급 및 점검을 위해 반드시 필요하여 본 과제 종료이후에도 꾸준히 게르마늄 농작물 재배 농작물의 게르마늄 함량 분석에 대한 지원을 할 계획이다.

#### 7. 특허, 품종, 논문 등 지식재산권 확보계획

본 연구를 통해 그동안 꾸준히 국내외 저명학술지에 논문을 게재하였고, 국내외 학술발표회에서 다수의 연구성과를 발표하였다. 특히 본 연구결과 중 우수결과는 현재 SCI 저널에 투고중에 있으며, 3차년도 연구결과와 전체적인 종합결과를 이용하여 국내외 저명학술지에 향후 몇년간 꾸준히 투고하여 본 개발 기술을 홍보하고 보급할 계획이다.



## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

게르마늄은 1930년 프랑스와 스페인의 국경지방인 Lourdes의 샘플에서 게르마늄의 약리효과가 알려진 이후 약리효과 측면에서 그 동안 많은 연구가 수행되었다. 현재 활발하게 게르마늄 관련 연구를 수행하는 기관 중 Asai Germanium Research Institute (일본)에서는 무기게르마늄인 이산화게르마늄으로부터 유기게르마늄 (Ge-132) 합성 연구를 수행하고 있고, Smith Kline & French Lab. (미국)에서는 Spirogermanium의 항관절염 효과 검정 연구를 수행하고 있다. 또한 하와이대학교 식물학과 (미국)에서는 게르마늄의 식물독성과 규소의 관계 연구를 활발히 수행중에 있다. 국내에서는 건국대학교 생화학과에서 미생물을 이용하여 무기게르마늄을 유기게르마늄으로 전환 연구를 수행하고 있으며, 부산대학교 식품영양학과에서는 게르마늄 수용액으로 재배한 콩나물의 기능성 검정 연구를 수행하고 있다. 경상남도농업기술원에서 경남지역 토양중 게르마늄 함량 조사 및 포트실험을 이용한 벼와 상추의 게르마늄 흡수량 연구가 최근에 수행되었다.

게르마늄은 반도체산업의 재료, 독성 및 약리효과 측면에서 그 동안 많은 연구가 수행되었지만 외국의 경우도 게르마늄의 농업적 측면에서 연구 결과는 거의 없는 편이다. 우리나라 경우도 미생물을 이용한 유기게르마늄 연구와 작물에 대한 게르마늄 연구가 일부 연구자에 의해 보고되었으나 매우 미미한 실정이며, 특히 농업적 측면에서의 연구는 거의 없는 실정이다.



## 제 7 장 참고문헌

- Ahn, Y. K., Kim, J. H., Lee, S. K. and Kim, H. S. 1989. The effect of eicosapentaenoic acid on the immune response in mice( I ). *Yakhak Hoeji*, 33, 20
- Aso, H., Suzuki, F., Ebina, T. and Ishida, N. 1989. Antiviral activity of carboxyethylgermanium sesquioxide(Ge-132) in mice ingected with influenza virus. *J. Biol. Respose Mod.*, 8(2) : 180-189.
- Aso, H., Suzuki, F., Yamaguchi, T., Hayashi, Y., Ebina, T. and Ishida, N., 1985, Induction of interferone and activation of NK cells and macrophages in mice by oral administration of Ge-12, and organic germanium compound. *Microbiol. Immunol.* 29(1) : 65-74.
- Azam, F. and B.E. Volcani. 1974. Role of silicon in diatom metabolism VIactive transport of germanic acid in the heterotrophic diatom *Nitzchia alba*. *Arch. Microbiol.* 101 : 1-8.
- Bernstein L. R. 1985c. Geology and mineralogy of the Apex mine, Washington County, *Utah. U.S. Geol. Surv. Open File Rep.* 85-511, p. 21.
- Bernstein, L, R., 1985. germanium geochemistry and mineralogy, *Geochim. Comochim. Acta* 49, p. 2409-2422.
- Bernstein, L, R., 1985b. Renierite,  $Cu_{10}ZnGe_2Fe_4S_{16}Cu_{11}GeAsFe_4S_{16}$  : a couple soil solution series, *Amer. mineral.* in press).
- Burton, J. D., Culkin, F. and Riley, J. P, 1959. The abundances of gallium and germanium in terrestrial materials., *Geochim. Cosmochim. Acta* 16, p. 151-180.
- Chemielowski, J. and B. Klapcinska 1986. bio accumulationdf germanium by *Pseudomonase putida*in the presence of two selected substrates. *Appl. Environ. Microbiol.* 51 : 1099-1103.
- Cho, B. C. 1998. Research on the Conversion of  $GeO_2$  to Organic Germanium by Microorganism. *Department of Biochemisty, Kon-Kuk university.* 9(1) : 71-80.
- Choi, J. C. and Cheon, D. K., 2002, Effect of Harvest Time on Yield and Quality of Rice. *Korean J. Crop Sci.* 47(3) : 254-258.
- Choi, W. H., and J. M. Lee, 1992. *Analytical Science & Technology.* 5(1), 17.
- Connor, J. J. and Shacklette, H. T., 1975. Background geochemistry of some rocks, soil, plants and vegetables in the conterminous United States., *U.S. Surv. Prof. Pap.*, 574, 168.

- Connor, J. J. and Shacklette, H. T., 1975. Background geochemistry of some rocks, soil, plants and vegetables in the conterminous United States., *U.S. Surv. Prof. Pap.*, 574, 168.
- Cowgill UM. 1983. The distribution of selenium and cancer mortality in the continental United States *Biol Trace Elem. Res.* 5, 345–361.
- Dakley, W.M. and Volcani, B.E. 1969. Role of silicon in diatom metabolism. A silicon requirement for deoxyribonucleic acid synthesis in the diatom *cylindrotheca fusiformis* remann and lewin, *Exptl. Cell. Res.*, 58, 334–339.
- Datnoff. L. E., G. H.. Snyder., G. H. Korndöref. 2001. Silicon in Agricutture.
- Datnoff. L. E., Snyder, G. H. and Korndörfer, G. H., 2001, Silicon in Agriculture. Elsevier Science, 1 edition.
- Davydov, V.L. 1966. germanium. Gordon and Breach Science Publishers; New York, NY.
- Dijkshoorn W. and A. L. Van Wijk. 1967. the sulfur requirements of plants as evidenced by the Sulfur–nitrogen ratio in the organic matter. *Plant and Soil.* 26 : 129–157.
- Dimartino, M. J. 1986. Antiarthritic and immunoregulatory activity of spirogermanium. *J. Pharmacol. Exp. Ther.*, 236(1) : 103–110.
- Eaton, S. V. 1935. Influence of sulfur deficiency on the metabolism of the soybean. *Botan. Gaz.* 97 : 68.
- Evans, G.W., Majors, P.F, and Cornatzer, W.E 1970. Mechanism for cadnium and Zink antagonism of copper metabolism, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 40. 1142.
- Food and Nutrition Bord National Research Council Recommended Dietary Allowances 10th ed Washington, DC National Academy Press, 1989.
- Forstrom JW, Zakowski JJ and Tappel AL. 1978. Identification of the catalytic site of rat liver glutathione peroxidase as selenocysteine *Biochemistry* 17, 2639–2644.
- Froelich, P. N. Jr. and Andreae, M. O., 1981. The marine geochemistry *Bull.(tokyo)* 28, p. 2687–2691.
- Fujii, A., Kuboyama, N., Yamane, J., Nakao, S. and Furukawa, Y. 1993. Effect of organic germanium compound (Ge–132) on experimental osteoporosis in rats.*Gin. Pharmac.*, 24(6) : 1527–1532.
- Funk M, Hamlin L, Picciano MF, Prentice A, Milner JA. 1990. Milk selenium of rural african women influence by maternal nutrition, parity, and length of lactation *Amer. J. Clin. Nutr.* 51. 220–224.
- Glockling, F. 1969. The Chemistry of Germanium. Academic Press, New York, NY.

- Gondman S. 1988. Therapeutic effects of organic germanium. *Med Hypotheses* 26 : 207–215.
- Goto. H. 1989. 奇蹟의 藥草 名日葉, . 二見書房, 東京 日本. p. 249.
- Halperin, S.J., Barzilay, A., Carson, M., Robers, C. and Lynch, J. 1995. Germanium accumulation and toxicity in barley. *Journal of Plant Nutrition*, 18(7) : 1417–1426.
- Han, S. S., Y. S. Rim, and I. K. Kim. 1997. *Analytical Science & Technology*. 10(3), 179.
- Hanna, N. and Fildler, I. J. 1980. Role of natural killer cells in the destruction of circulating tumor emboli. *J. Natl. Cancer Inst.*, 65, 801.
- Harish, G. 1985. Glutathione and glutathione-dependent enzymes of the rat liver after different doses of sanumgerman. In "1st Int. Conf. on germanium" Hanover, Oct. 1984 Lakin & Samochowiec, des, Semmelweis-Verlag.
- Higuchi, I., Takahashi, K., Nakahara, K., Izumo, S., Nakagawa, M. and Osame, M. 1991. Experimental germanium myopathy. *Acta -Neuropathol-(Berl)*, 82(1) : 55–59.
- Hill BT, Whatley SA, Bellamy AS, Bellamy AS, ET AL. 1982. Cyto -toxic effects and biological activity of 2-aza-8germanspiro[4,5]-decane-2-propanamin-8,8-diethyl-N,N-diemthyl dichloride (NSC- 192965; spirogermanoum) in vitro. *Cancer Res* 42 : 2852–2856.
- Ho, C.C., Cherm, Y.F. and Lin,M.T. 1990. Effects of organogermanium compound 2-carboxyethylgermanium sesquioxide on cardiovascular function motor activity in rats. *Pharmacology*, 41, 286–291.
- Holmgren, G. G. S., M. W. Meyer, R. L. Chaney and R. B. Daniels. 1983. Cadmium, lead, zinc, copper and nickel in agricultural soils of the United States of America. *J. Environ. Qual.* 22 : 335–348.
- Huang, J. W. W., J. J. Chen, W. R. Berti, and S. D. Cunningham. 1997. Phytoremediation of lead-contaminated soil : Role of synthetic chelates in lead phyto extraction. *Environmental Science & Technolgy*. 31(3) : 800–805.
- Hwang, S. H., 2008, Effect of Organic and Inorganic Germanium On Growth and Its Uptake of Rice in Paddy Soil Condition. Master Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.
- Iijima, M., Mugishima, M., Takeuchi, M., Uchiyama, S., Kobayashi, I. and Maruyama, S. 1990. A case of inorganic germanium poisoning with peripheral and cranial nephropathy. Myopathy and autonomic dysfunction, 42(9) : 851–856.

- Ishiwata, Y., Yokochi, S., Hashimoto, H., Ninomiya, F., and Suzuki, T. 1998. Protection against concanavalin A-induced murine liver injury by the organic germanium compound, propagermanium. *Scand. J. Immunol.*, 48 : 605-614.
- Ishiwata, Y., Yokochi, S., Suzuki, E., Michishita, H., Tashita, A., Asano, K., Mitani, T., and Kurono, M. 1990. Effects of proxi- germanium on interferon production and 2',5'-oligoadenylate synthetase activity in the lung of influenza virus-infected mice and in virus-infected human peripheral blood mononuclear cell cultures. *Arzneim.-Forsch./Drug Res.*, 40(II) : 896-899.
- Jang, B. C., and M. U. Park. 1997. Absorption and accumulation of Sr-85 by rice (*Oryza sativa* L.) and its transfer factor from soil to plant. *Korean J. Soil Science & Fertilizer*. Vol. 30(2) : 184-188
- Jang, J.J., Cho, K. J., Lee, Y. S. and Bae, J. H., 1991, Modifying responses of allyl sulfide, indole-3-carbinol and germanium in a rat multi-organ carcinogenesis model. *Carcinogenesis* 12(4) : 691-695.
- Jang, J. J., K. J. Cho, Y. S. Lee, and J. H. Bae. 1991. Modifying responses of allyl sulfide, indole-3-carbinol and germanium in a rat multi-organ carcinogenesis model. *Carcinogenesis*, 12(4) : 691-695.
- Jao S.w., W. Lee. and Y. S. Ho. 1990. Effect of germanium on 1,2-dimethylhydrazin induced intestinal cancer in rats. *Dis. Colon Rectum*. 33, 99-104.
- Jeong, S. I., H. J. Chun, and I. K. Kim. 1998. Determination of germanium (IV) content in the korea medicinal herbs by adsorption stripping voltammetry. *Analytical Science & Technology*. 11(5.)
- Joe, S. K. 2001. Determination of germanium by the oseryoung wave voltammetry. GongJu Univ.
- Jung, G. B., W. I. Kim, K. H. Moon, and I. S. Ryu, 2000. Comparisons
- Kada, T.H. Mochizuki, and K. Miyao. 1984. Antimutagenic effects of germanium oxide on trp-p-2-induced frameshift mutation in *Salmonella typhimurium* TA98 and TA1538. *Mutat. Res.* 125 : 145-153.
- Kehlbeck, H. 1983. New germanium containing yeast for medicinal and veterinary use. *Deutsch Patent DE*. 3345211
- Kim, B. J., B. K. Jung, J. W. Choi, E. S. Yun and S. Choi. 1995. Heavy metals in paddy soil of korea. *Korean J. Soil Science & Fertilizer*. Vol. 28(4) : 295-300.

- Kim, K. S., H. S. Ham, J. H. Kim, and W. B. Park. 1995. Intracellular accumulation of germanium by germanium tolerant yeast cells.
- Kim, S. T., C. W. Lee, B. S. Choi, B. C. Lee,. 1998. Determination of germanium in ginseng radix by hydride generation inductively coupled plasma spectrometry. *J. Kor. Soc. Anal. Sci.* 2(2) : 203–209.
- Klapcinska, B. and J. chielowski. 1986. Binding of germanium to *Pseudomonase putida* cell. *Appl. Environ. Microbiol.* 51(5) : 1144–1147.
- Komuro, T., Kaimoto, N., Katayama, T. and Hazato, T. 1986. Inhibitory effects of GE–132 derivatives on enkephalin–degrading enzymes. *Biotechnol. Appl. Biochem.*, 8 : 379–386.
- Kowel, N.E., Johnson. D.E., Kaemer. D.F. and P. H.R. 1979. Normal levels of cadmium in diet, urine, blood and tissues of inhabitants of the United States. *J. Toxicol. Environ. Health* 5, 995.
- Kumano, N., Nakai, Y.,Ishikawa, T., Koinumaru, S., Suzuki, S. and Konno, K. 1978. Effect of carboxyethylgermanium sesquioxide in the methylcholathrene induced tumorigenesis. *Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ.*, 25, 89–95.
- Kumano, N., T. Ishikawa. S. Koinumaru. 1985. Antitumor effect of the organicgermanium compound Ge–132 on the Lewis lung carcinoma(34) in C57 BL/6 (B6) mice. *Tohoku J. Exp. Med.* 146, 97–104.
- Kumpulainen J, Salmenpera L, Simes MA et al. 1985. Selenium status of exclusively breast–fed infants as influenced by maternal organic or inorganic selenium supplementation. *Amer. J. Clin. Nutr.* 42, 829–835.
- Kwak, T. S. and Yeo, J. H., 2004, Variation of Grain Quality and Grain Filling Rapidity Milyang 23 / Gihobyeo Recombinant Inbred Lines. *Korean J. Crop Sci.* 49(3) : 160–166.
- Lee, H. M. and Chung, Y. 1991. Effect of organic germanium on metallothionein induction in liver and kidney of cadmium and mercury intoxicated rats. *Yakhak Hoeji*, 35(2) : 99–110.
- Lee, H. M. and Chung, Y. 1991. Effect of organic germanium on metallothionein induction in liver and kidney of cadmium and mercury intoxicated rats. *Yakhak Hoeji*, 35(2) : 99–110.
- Lee, H., Travers, J.T., and M.I. Van Dyke, 1990. Microbial interactions with germanium, *Biotechnol. Adv* 8, 539–546.

- Lee, J. H., Cho, Y. S., Song, M. T., Yang, S. J., Hwang, H. G., Kim, N. S., Choi, H. C. and Moon, H. P., 2000, Analysis of Quantitative Trait Loci (QTLs) related to Rice Gelatinization. *Korean J. Breeding Sci.*32(3) : 211–217.
- Lee, J. H., and S. B. Namkoong. 1997. Effect of germanium treatment on absorption of mineral element in rice seedling. *J. Life Sci. & Nat. Res. Wonkwang Univ.* 20 : 27–34.
- Lee, M. S., J. H. Lee, T. O. Kwon and S. B. Namkoong. 1995. Increment of germanium of contents in *Angelica Keiskei* Koidz and *Panax ginseng* C.A Meyer by in vitro propagation. *Korean J. Medicinal Crop Sci.* 3(3) : 251–258.
- Lee, M. S., S. J. Kim, S. H. Baek, and S. B. Namkoong, 1995. Basic studies for Increment of Germanium Contents in *Angelica Keiskei* Koidz., and *A. acutiloba* Kitagawa. *Korean. J. Medicinal Crop Sci.* 3(1) : 45–49.
- Lee, S. T., 2004, Characteristics of growth response and germanium absorption of crops in soil treated germanium. Doctor Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.
- Lee, S. T., Lee, Y. H., Bhan, K. N., Seo, D. C. and Heo, J. S., 2005, Growth characteristics and germanium absorption in Lettuce with different concentrations of germanium in soil. *Korean J. Environ. Agric.* 24(4) : 404–408.
- Lee, S. T., Lee, Y. H., Lee, H. J., Cho, J. S. and Heo, J. S. 2005. Growth characteristics and germanium absorption of rice plant with different germanium concentrations in soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture.* 24(1), 40–44.
- Lewis B. L., Froelich, P. N. and Andreae, M. O., 1985. Methylgermanium in natural waters. *Nature* 313, p. 303–305.
- Lim, J. S., Seo, D. C., Park, W. Y., Cheon, Y. S., Lee, S. T., Cho, J. S. and Heo, J.S., 2008, Effects of Soil Texture on Germanium Uptake and Growth in Rice by Soil Application with Germanium. *Korean J. Environ. Agric.* 24(4) : 404–408.
- Liu J, Gilbert K, parker HM, HaschekWM, Milner JA. 1991. Inhibition of 7,12–dimethylbenz(a) anthracene–induced mammary tumors and DNA adducts by dietary selenite *Cancer Res* 51 4613–4617.
- Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L., and Randall, R.J. 1951. Protein measurement with the folin phenol reagent, *J. Biol. Chem.*, 193, 265–275.
- Ludwik H. 1985. Determination of germanium in silicate rock and sulphide ores by hydride generation and flame atomic absorption spectrophotometry. *Analyst.* 110 : 943–946.



- Ma. F. J., E. Takahashi. 2002. Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan.
- Manskaya, S. M., Drozdova, T. V., 1968. *Geochemistry of organic substances.*, pergamon Press. Oxford.
- Matsumoto, H., S. Syo, and E. Takahashi. 1975. Translocation and some forms of germanium in rice plants. *Soil Sci. Plant Nutr.* 21 : 273–279.
- Merian, E ed). 1991. Metals and their compounds in the environment : *VCH*, Weinheim, p. 921–929.
- Ministry of Environment. 1996. Standard test method for soil pollution.
- Mochizuki, H. and Kada, T. 1982. Antimutagenic effect of Ge-132 on  $\gamma$ -ray-induced mutation in *Escherchia coli* B/rWP2 trp-. *Int. J. Radiat. Biol.*, 42(6) : 653–659.
- Nagai, H., Hasegawa, K. and Shimpo, K. 1980. Reproductive study of rats intraperitoneally treated with carboxyethylgermanium sesquioxide (Ge-132). *Pharmacometrics*, 20(2) : 271–280.
- Nagai, H., Hasegawa, K. and Shimpo, K. 1980. Reproductive study of rats intraperitoneally treated with carboxyethylgermanium sesquioxide Ge-132). *Pharmacometrics*, 20(2) : 271–280.
- Nagata, N., T. Yoneyama, K. Yanagida, K. Ushio, S. Yanagihara, O. Matsubara, and Y. Eishi. 1985. *J. Toxicological Sci.*, 10, 333–341.
- Nagata, T., Aramaki, Y., Enomoto, M., Isaka, H, and Otuka, J. 1978. Chronic intravenously toxicity study with carboxyethylgermanium sesquioxide in beagle-dogs. *Pharmacometrics*, 16, 671–682.
- Nakada, Y., Kosaka, T., Kuwabara, M., Tanaka, S., Sato, K., and Koide, F. 1993. Effects of 2-Carboxyethylgermanium Sesquioxide (Ge-132) as an Immunological Modifier of Post-Surgical Immunosuppression in Dogs. *J. Ver. Med. Sci.*, 55(5) : 795–799.
- Nakamura T. and Orimo H. 1987. Influence of germanium on blood metabolism. *16th Annual Conf. for Germanium*. Vol 16, p. 14
- Namkoong, S. B. 1996. In vitro culture and increament of germanium content in the genus *Angelica L.* (Thesis pf Ph.D.). Graduate School, Wonkwang Univ.
- Nobohiro, W., Osamu, I., Dakuro, K. and Koichi, Y. 1980. New approaches to using *spent brewer's yeast*, *ASBC Journal*, 38, 5.
- Obara, K., Saito, T., Sato, H., Yamakage, K., Watanabe, T., Kakizawa, M., Tsukamoto, T., Kobayashi, K., Hongo, M. and yoshinaga, K. 1991. Germanium poisoning; clinical

- symptoms and renal damage caused by long-term intake of germanium. *Japanese Journal of Medicine*. 30(1) : 67-72.
- Ohotta T. Germanium may decrease the cancer incidence. Tokyo: Asu Books, 1984 : 42-55.
- Oikawa, H. and Kakimoto, N. 1968. Synthesis of carboxyethyl-
- Orimo H. and Watanabe M. 1985. Study on Ge-132 on activation of mouse osteoblast. *13th Annual Conf. for Germanium*. Vol. 13, p. 33-34.
- Park, B. W., J. H. Lee, and T. O. Kwon. 1996. Effects of GeO<sub>2</sub> and citric acid on germanium content of callus and plant in *Angelica koreana* MAX. *Korean J. Medicinal Crop Sci.* 4(2) : 101-108.
- Park, M. K., J. I. Park, S. B. Han, and I. H. Park. 1995. Analysis of organic germanium, Ge-132. *Analytical Science & Technology*. 8(3).
- Pendias, A. K. and Pendias, H., 1984. *Trace elements in soil and plant*, CRC Press. Inc.
- Puerner, N. J., Siegel, S. M. and Siegel, B. Z. 1990. The experimental phytotoxicology of germanium in relation to silicon Water, Air, and Soil Pollution, 39 : 187-195.
- Raisin, J., Hess, B., Blatter, M., Zimmermann, A., Descoedres, C., Horber, F.F. and Jaeger, P. 1992. Toxicity of an organic germanium compound; Deleterious consequences of a "Natural Remedy". *Schweiz-Med-Wocheuschr*, 122(1), 11-13.
- Rice L, Wheeler JW, and Geschickter CF. 1974. Spirans XXII. Synthesis of 4,4-dialkyl-4-germacyclohexanone and 8,8-dialkyl-8-
- Robin, M. Slawson, Michele I. Van Dyke, Hung Lee and Jack T. Trevors. 1992. Germanium and silver resistance, accumulation, and toxicity in microorganisms. *Plasmid*. 27 : 72-79.
- Rotruck J. T., Pope A. L., Ganther H. E. 1973. Selenium Biochemical role as a component of glutathione peroxidase *Science* 179 588-590.
- Rural Development Administration., 1988, Methods of soil chemical analysis. National Institute of Agriculture Science and Technology, Suwon (in Korea).
- Ryu, S. H., J. R. Lee, and K. H. Kim. 1995. Sequential extraction of Cd, Zn, Cu, and Pb from the polluted paddy soil and their behavior. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 28(3) : 207-217.
- Sanai T., N. Oochi, and D. Okuda. 1990. Subacute nephrotoxicity of germanium dioxide in the experiment animal. *Toxicol Appl. Pharmacol.* 103, 345-353.
- Sanai T., S. Okuda, and K. Onoyama. 1991. Chronic tubulointerstitial changes induced by germanium dioxide comparison with carboxyethyl

- Sanai, T., Onoyama, K., Osato, S., Motomura, K., Oochi N., Oh, Y., Okuda, S., Takaichi, S. and Fujishima, M. 1991. Dose dependency of germanium-dioxide-induced nephrotoxicity in rats. *Nephron*, 57(3) : 349-354.
- Sanai, T., Onoyama, K., Osato, S., Motomura, K., Oochi N., Oh, Y., Okuda, S., Takaichi, S. and Fujishima, M., 1991, Dose dependency of germanium-dioxide-induced nephrotoxicity in rats. *Nephron* 57(3) : 349-354.
- Sanai, T., Oochi, N. and Okuda, D., 1990, Subacute nephrotoxicity of germanium dioxide in the experiment animal. *Toxicol Appl. Pharmacol.* 103 : 345-353.
- Sanai, Y., Okuda, S. and Onoyama, K. 1990. Germanium dioxide-
- Sasaki, K., Ishikawa, M., Monma, K. and Takayanagi, G. 1984. Effect of carboxyethylgermanium sesquioxide(Ge-132) on the acute inflammation and CCl<sub>4</sub> induced hepatic damage in mice. *Pharmacometrics*, 27(6) : 1119-1131.
- Schauss A.G. 1991. Nephrotoxicity and neurotoxicity in humans form organogermanium compounds and germanium dioxide. *Biol. Trace Elem. Res.* 29, 267-280.
- Schauss A.G. 1991. Nephrotoxicity and neurotoxicity in humans form organogermanium compounds and germanium dioxide. *Biol. Trace Elem. Res.* 29, 267-280.
- Shin, H. S., Y. S. Oh, and H. S. Shin. 1996. A study on the analysis of germanium in inorganic matrices by differential plus polarography. *Analytical Science & Technology.* 9(3).
- Shuman, L. M. 1985. Fractionation method for soil microelement. *soil science.* 140(1) : 11-22.
- Slavik M, Elias L, MremaJ, ET AL. 1982. Laboratory and clinical studies of spirogermanium, a novel heterocyclic anticancer drug. *Drug Exp Clin Res* 8 : 379-385.
- Slawson, R.M., Van Dyke, M. I., Lee, H. and Trevors, J.T 1992. Germanium and silver resistance, accumulation, and toxicity in microorganisms. *Plasmid.* 27 : 72-79.
- Song, W. J., S. C.Lee., and T. K. Oh, 1995. Perparation of organic germanium by yeast cell. *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* Vol. 23(1) : 87-90.
- Sparkman,D.H., W.H. Stein, and S. Moore. 1958. Automatic recording apparatus for use in the chromatography of amino acids. *Anal. Chem.* 30 : 1190-1197.
- Sugiya, Y., Sakamaki, S. and Satoh, H. 1986 Reversibility study in rats after two months' oral administration of carboxyethylgermanium sesquioxide(Ge-132) in rats. *Pharmacometrics*, 31(6) : 1191-1200.

- Sugiya, Y., Yoshida, K., Sakamaki, S., Eda, K. and Satoh, H. 1986. Reproductive and teratogenic studies of carboxyethylgermanium sesquioxide(Ge-132) Teratogenesis study in rats by intravenous administration. *Pharmacometrics*, 32(1) : 123-138.
- Suzuki, F. 1985. Antitumor activity of Ge-132, a new organogermanium
- Suzuki, F., Brutkiewicz, R. R. and Pollard, R. B., 1986, Cooperation of lymphokine(s) and macrophages in expression of antitumor activity of carboxyethylgermanium (Ge-132). *Antitumor Res.* 62(2) : 177-182.
- Suzuki, F., R. R. Brutkiewicz, R. B. Pollard. 1985. Ability of sera from mice treated with Ge-132, an organic germanium compound, to inhibit experimental murine ascites tumors. *Br. J. Cancer.* 52, 775-763.
- Suzuki, F., R. R. Brutkiewicz, R. B. Pollard. 1985. Ability of sera from mice treated with Ge-132, an organic germanium compound, to inhibit experimental murine ascites tumors. *Br. J. Cancer.* 52, 775-763.
- Suzuki, Y. and Taguchi, K. 1983. Pharmacological studies of carboxyethylgermanium sesquioxide(Ge-132). *Pharmacometrics*, 26(5) : 803-810.
- Talmadge, J. E., Meyers, K. M., Prieur, D. J. and Starkey, J. R. 1980 Role of NK cells in tumor growth and metastases in beige mice. *Nature*, 284, 622.
- Van Dyke M. I., H. Lee and J. T. Trevors. 1989b. Germanium accumulation by bacteria. *Arch. Microbiol. Biotechnol.* 23(1) : 87-90.
- Van der Spoel, J.I., Stricker, B.H., Schipper, M.E., de Breijin, W., de Smet, P.A. And Esseveld, M.R. 1991. Toxic damage of kidney, liver and muscle attributed to the administration of germanium-lactate-citrate. *Nederlands Tijdschrift voor Geneeskunde*, 135(25) : 1134-1137.
- Vlasov, K. A(ed). 1966. Geochemistry and mineralogy of rare elements and genetic types of their deposits : Vol.II, Mineralogy of rare elements., *Israel Program for Scientific Translations Jerusalem*, p. 606-632.
- Warburd O. 1996. The prime cause and prevention of cancer: Lindalecture. Wurzburg, Germany.
- Watanabe M. and Orimo H. 1986. Activation of mouse osteoblasts by Ge-132 and the other germanium compounds. *15th Annual Conf. for Germanium*, Vol. 15, p. 25-28.
- Wei, X. S. 1992. Effect of yeast on bioenrichment of germanium. *Food Science.* 149 : 49-54.

- Werner, D. 1967. Untersuchungen über die Rolle der Kieselsäure in der Entwicklung höherer Pflanzen. I. Analyse der Hemmung durch Germanium-säure. *Planta* 76 : 25-36.
- Yanagimoto, M., Saitoh, H. and Kakimoto, N. 1983. Alkaline shift effect on the uptake of germanium by algae, *Chlorella ellipsoideae*, *Oscillatoria* sp. and *Spirulina platensis*. *J. Ferment, Technol.*, 61(3) : 233-238.
- Yang, L.I., and Zhang, D. 2001. Direct determination of germanium in botanical samples by graphite furnace atomic absorption spectrometry with palladium-zirconium as chemical modifier. Elsevier Science B. V.
- 김선태, 이종욱, 최범석, 이병조. 1988. 수소화물 유도결합플라즈마 분광법에 의한 인삼중의 게르마늄 정량. *한국분석과학회지*. 1(2) : 203-209.
- 남궁승박. 1995. *Angelica*속 식물의 기내배양 및 germanium 함량증대. 원광대학교 박사학위논문. p. 9-10.
- 농민신문. 2002년 5월13일
- 농업과학기술원. 1999. 작물별 시비처방 기준. 상록사.
- 농촌진흥청 농업기술연구소. 1977. 土壤別 土地利用區分 土壤調査資料. 1964-1976. 水原.
- 농촌진흥청 농업기술연구소. 1992. 한국토양총설. p. 27-186.
- 이만상, 김성조, 백성화, 남궁승박. 1995. 명일엽과 일당귀의 Germanium 증대를 위한 기초연구. *한국약용작물학회지* 3(1) : 39-43.
- 이민효. 1990. 논 토양중 Cadmium의 분석방법에 관한 연구. 경상대학교대학원학위논문.
- 임수길, 이영준, 최호진. 1991. 토양중에서 Cd, Cu 및 Zn 흡착 및 용탈에 미치는 토양용액 pH의 영향. *한국환경농학회지*. 10(2) : 119-127.
- 전호식. 2000. 암석, 토양, 농작물 시스템에서의 게르마늄(Ge) 및 관련원소들의 지구화학적 분산연구. 한양대학교대학원 석사학위논문.
- 高橋英一, 蕭聰明 三宅靖人. 1976a. ケイ散植物のゲマニウムに對生肉反應の特異性について(その1-2). ケイ酸の比較植物營養學的研究(第1-2報). *日土肥誌* 47(5) : 83-197.
- 高橋英一, 蕭聰明 三宅靖人. 1976b. ケイ散植物のゲマニウムに對生肉反應の特異性について. ケイ酸の比較植物營養學的研究(第3報). *日土肥誌* 47(5) : 217-221.
- 藤村 みつ子. 1979. 埼玉 衛生短大紀要. 제 4호, 9
- 水野卓, 太田原紳一, 李敬軒. 1988. 藥用キノコの灰分組成とゲルマニウム含量について. 静岡大學農學部研究報告. 38 : 37-46.
- 若月利之, 松尾嘉郎. 1978. 토양중 諸元素 天然賦在量(제1보). *日本土肥誌* 49(6) : 507-512.
- 淺井一彦. 1975. 驚異の元素ゲルマニウムと私. 玄同社. 東京, p. 100-102

韓昶烈, 李萬相, 李重浩, 全炳機. 1980. 高麗人蔘의 組織培養에 關한 研究. 특히 Germanium의 效果에 對하여. 圓光大學論文集. 3 : 49-56.

和田攻, 長橋捷. 日本 師會雜誌.

## 주 의

1. 이 보고서는 농림수산식품부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림수산식품부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.